Astronomía Elemental

Volumen II: Astrofísica y Astrobiología

Isaías Rojas Peña

Enero de 2015

Imagen de cubierta:

Es un montaje del grabado de Flammarion coloreado y la fotografía del espacio profundo del Telescopio Espacial Hubble © R. Williams (STScI), Hubble Deep Field Team y NASA. La idea original de este montaje es de Matthew Ota.

Editorial USM

Fono: +56 32 2654000, +56 32 2654106
Av. España 1680 Valparaíso, Chile.
www.editorial.usm.cl

ISBN Obra Completa: 978-956-332-535-5

ISBN Volumen II: 978-956-345-595-3

Diseño cubierta: Carolina Barrios Tubino.

Ilustraciones: Adolfo Pérez Saavedra.

Página web del libro: http://astronomia-elemental.blogspot.com/

Comentarios y sugerencias, escribir al autor a: *irojasp@gmail.com*

Presentación

Este texto es el resultado de muchas charlas y clases que he impartido, principalmente en la *Sociedad Astronómica de Valparaíso y Viña del Mar*[1], la *Associazione Ligure Astrofili Polaris*[2] de Génova (Italia) y en el curso básico de astronomía que impartí entre los años 2000 y 2003 en el *Colegio Winterhill*. Además de los cursos "Astronomía para Todos" y "Vida en el Universo" impartidos en el campus de Viña del Mar de la *Universidad Nacional Andrés Bello*, el primero entre los años 2006 y 2009 y el segundo, el segundo semestre del año 2007 y 2008 y en parte de las asignaturas "Física General IV" e "Introducción a la Astrofísica" que he impartido durante el año 2011 en la Casa Central de la *Universidad Técnica Federico Santa María*.

Este texto intenta describir los principales descubrimientos astronómicos desde nuestro sistema solar hasta el Universo a gran escala. Para cumplir estos objetivos, el texto se divide en capítulos distribuidos en cuatro partes:

1. Introducción a la astronomía

I. Astronomía básica

2. Elementos de astronomía geocéntrica

3. Elementos de mecánica celeste

II. De las estrellas a la vida

4. Elementos de astronomía estelar

5. Astronomía planetaria

6. Bioastronomía

III. El Universo

7. Astronomía galáctica y extragaláctica

8. Elementos de gravitación y cosmología

IV. Apéndices

---

[1]http://www.astrosaval.cl

[2]http://www.astropolaris.it/

El *primer capítulo* pretende que el lector pueda adquirir nociones básicas de la ciencia de mayor desarrollo y potencialidad en Chile, para ello se revisa la visión científica de mundo y como la ciencia construye modelos que pretenden representar la naturaleza, posteriormente entrega una visión amplia de la astronomía moderna, sus áreas de estudio y como ésta se relaciona con las otras ciencias.

La *primera parte* se compone de dos capítulos. El *segundo capítulo* entrega los fundamentos de la astronomía geocéntrica, de forma que el lector pueda comprender como los diversos fenómenos astronómicos influyen o han influido la vida cotidiana del ser humano. El *tercer capítulo* pretende entregar al lector los nuevos conocimentos adquiridos y desarrollados desde Copérnico hasta Newton.

La *segunda parte* se compone de tres capítulos, y el grado de complejidad es mayor que el de la primera parte. Para comprender los capítulos se requiere un lector con conocimientos de nivel de enseñanza secundaria, aunque los apéndices entregan de manera complementaria a los capítulos, resúmenes de los conocimentos de base. El *cuarto capítulo* estudia las estrellas, comenzando por el Sol para continuar con formación estelar y el ciclo de vida de las estrellas. El *quinto capítulo* estudia los planetas y complementa la formación estelar analizando la teoría de formación planetaria, se estudia el sistema solar y los planetas extrasolares. El *sexto capítulo* intenta entregar una visión científica sobre el origen de la vida en la Tierra y la posible existencia de ella en otros lugares de nuestra galaxia.

La *tercera parte* se compone de dos capítulos. El *séptimo capítulo* estudia las galaxias, revisando su estructura, composición, morfología y las estructuras que ellas forman a gran escala. El *octavo capítulo* estudia la teoría de la gravitación de Einstein, y algunas de sus aplicaciones y/o consecuencias, por ejemplo la teoría de agujeros negros y las modernas teorías del origen y evolución del Universo.

La *cuarta parte* se compone de los apéndices, que son complementos de los diversos capítulos, cuya finalidad es proveer de repasos de temas que son parte del curriculum de asignaturas científicas de la enseñanza media chilena.

Por diversas razones la obra se ha dividido en tres volúmenes; el primero comprende al capítulo 1 y la primera parte: "Astronomía Básica" (capítulos 2 y 3), siendo este el nombre del volumen, el segundo volumen, denominado "Astrofísica y Astrobiología", comprende la segunda parte (capítulos 4 al 6) y el tercer volumen, denominado "El Universo", comprende la tercera parte.

Esta división ha permitido separar la astronomía básica de la astronomía básica-intermedia, refiriéndose al nivel de dificultad de los contenidos, siendo el primer volumen accesible a todo tipo de público, pudiendo incluso ser considerado como material de divulgación, el segundo y tercer volumen, aunque mantiene un nivel básico, cumple un objetivo educacional, por lo que requiere de un lector motivado (profesores, estudiantes, aficionados, autodidactas).

Isaías Rojas Peña.

Padua, mayo de 2012.

Prólogo del Segundo Volumen

La Astronomía nace en los albores de la civilización y por ello es la ciencia más antigua pero al mismo tiempo es una de las más modernas que podemos encontrar. Por siglos representó lo más avanzado del género humano en términos de un modelo de la naturaleza. El universo geocéntrico de Claudio Ptolomeo fue, por 14 siglos, la joya del intelecto humano. Con Nicolás Copérnico e Isaac Newton la astronomía y la ciencia alcanza los niveles sobresalientes que han hecho que hoy la tecnología constituya una parte esencial de nuestras vidas.

Chile, con ese cielo puro y azulado que proclama nuestro himno patrio, se ha convertido en la ventana austral del universo. Más del 50 % de toda la capacidad mundial de observación del cielo se encuentra entre el valle del Elqui y la región de Antofagasta; se estima que en una década ese porcentaje aumentará al 70 %. Chile está llamado a jugar un rol fundamental en el desarrollo de la astronomía mundial en el siglo XXI y con ello nuestro jóvenes están convocados a sumarse a esta bella aventura intelectual que presenta enormes desafíos al género humano.

En la formación de los futuros astrónomos y gente culta de nuestra patria, un nuevo libro de astronomía es siempre motivo para celebrar. En esta ocasión Isaías Rojas nos presenta en esta obra las características más relevantes de las estrellas, los sistemas planetarios que suelen acompañarlas y la vida que podríamos encontrar en esos planetas. Las estrellas son las células del universo. En gran escala encontramos cúmulos de galaxias, miles de millones de galaxias y en cada una de ellas, cientos de miles de millones de estrellas. Sin entender acerca de las estrellas nuestra comprensión del universo será siempre muy limitada. Las estrellas y la vida en el universo son dos temas claves de la ciencia contemporánea.

Este es un libro técnico, pensado para estudiantes universitarios que se encaminan a completar un grado académico en astronomía o ciencias afines. Ellos serán el relevo en el camino iniciado en Chile hace ya tanto tiempo con el Observatorio Astronómico Nacional, fundado en 1852, por el Presidente Manuel Montt. Hoy más que nunca ser astrónomo en Chile es una posibilidad fascinante. Ojalá muchos jóvenes talentosos se sientan atraídos. Sin dudas las páginas de este libro serán una enorme guía en ese camino.

Todo libro para enseñar ciencias básicas es un acto de generosidad. En particular, en Chile, no se puede ver otra motivación en un autor que no sea la de un gran acto de entrega. Una inmensa dedicación para transmitir a las nuevas generaciones lo que ha sido el fruto de largos años de estudio del autor. El trabajo de escribir un libro representa cientos de horas, miles de horas, de concentración solitaria del autor para cuidar la forma,

la palabra, la ilustración que mejor presente los conceptos involucrados. Felicito a Isaías Rojas por el enorme esfuerzo que ha hecho al dar a luz esta obra.

José Maza Sancho
Profesor de Astronomía
Universidad de Chile
Premio Nacional de Ciencias Exactas 1999.

Agradecimientos

Quiero expresar mis agradecimientos a todos aquellos que han hecho posible la existencia de este texto, primero a mis estudiantes que tuvieron que soportar mis no siempre didácticas explicaciones. A sus preguntas, comentarios de clase y a sus discusiones de los foros on-line. Quisiera también agradecer muy especialmente al profesor Nicolás Porras de la Universidad Técnica Federico Santa María por su colaboración y entretenidas discusiones pedagógicas y temáticas, y a todas las personas que han contribuído en la revisión de las innumerables versiones preliminares, en particular en este volumen, al Dr. Luis Paredes y al Ing. Gonzalo Contreras, ambos ex presidentes de la Sociedad Astronómica de Valparaíso y Viña del Mar, al Dr. José Maza Premio Nacional de Ciencias y profesor de la Universidad de Chile, al Dr. José A. Caballero del Centro de Astrobiología de Madrid, a la Dra. Maria Eliana Hidalgo profesora de la Universidad de Valparaíso, a la Dra. Millarca Valenzuela, al Dr. Matías Montesinos, al Ms. Jaime Sáenz, a la MBA. Zaida Ferreiro y a la actual presidenta de Saval, Ing. Moira Evans por su buena disponibilidad y constante colaboración.

Quiero también agradecer a todos aquellos que han autorizado el uso de sus fotografías o ilustraciones en este texto, en particular en este volumen: Dennis A. Bazylinski, Juan Carlos Casado, Don Dixon, Jim Emerson, François Forget, Lauri Laakso, MiIkka Dal Maso, Donald Mitchell, Roberto Osti, Matthew Ota, Simon Poulton, Esteban Reisin, Massimo Robberto, N. Rumiano, Jürgen Scheer, Dorottya Szam, Caroline Terquem, John Trauger, Tomonori Totani, Margaret Turnbull, Koen van Gorp, Nolan Walborn, Nicolle Rager Fuller, James Westphal, Eliot F. Young, revista Investigación y Ciencia, Annual Review of Astronomy and Astrophysics, American Association for the Advancement of Science (AAAS), EDP Sciences, IOP Publishing Ltd., Nature Publishing Group, Museo del Prado, Observatorio Europeo Austral (ESO), National Optical Astronomy Observatory de los Estados Unidos, National Solar Observatory de los Estados Unidos, Big Bear Observatory (Caltech), Australian Astronomical Observatory, Royal Observatory - Edinburgh, Lowell Observatory, U.S. Naval Observatory, Solar and Heliospheric Observatory (SOHO), International Astronomical Union, Center for Multiscale Modeling of Atmospheric Processes, U.S. Geological Survey, Geological Survey of Canada, Lawrence Berkeley National Laboratory, Woods Hole Oceanographic Institution, Real Academia de Ciencias de Suecia, Agencia Espacial Europea (ESA) y Administración Nacional de Aeronáutica, del Espacio de los Estados Unidos (NASA).

Quiero hacer extensivos los agradecimientos al Dr. Patricio Häberle y el Dr. Alfonso Zerwekh, directores del Departamento de Física de la Universidad Técnica Federico Santa María por apoyo a este proyecto, y a la editorial USM, por haber confiado en mí, y haber hecho posible que este trabajo fuera publicado con el sello USM.

Finalmente quisiera destacar la enorme utilidad para la elaboración de este texto de los servicios/productos de Google Inc. (google académico, google Earth, google books, el buscador y el traductor), y destacar además que gracias a google books es posible el acceso y la lectura de este libro a innumerables lectores de cualquier parte del mundo, algo impensable hace un par de décadas para una obra como ésta.

A mis profesores, en particular a aquellos que me guiaron y mostraron el camino a seguir y también a mis estudiantes, sin ellos, esto nunca hubiera sido posible...

Dedicado al Profesor de la Universidad Técnica Federico Santa María Nicolás Porras, quien aunque no fuera mi profesor, me ha guiado estos últimos años por el difícil camino de la docencia y la enseñanza, sin él, este libro no sería la obra en la que se ha convertido.

Índice Temático

II De las estrellas a la vida **73**

4. Elementos de astronomía estelar **75**

4.1. El Sol . . . 76
4.1.1. Generación de energía . . . 76
4.1.2. Composición química . . . 77
4.1.3. Estructura . . . 78
4.1.3.1. Estructura interna del Sol . . . 78
4.1.3.2. Estudio del interior del Sol . . . 79
4.1.3.3. La atmósfera solar . . . 80
4.1.4. Actividad solar . . . 84
4.1.4.1. Ciclo de manchas solares . . . 84
4.1.4.2. Fulguraciones . . . 85
4.1.4.3. Viento solar . . . 85
4.1.4.4. Origen de la actividad solar . . . 87
4.2. Las estrellas . . . 90
4.2.1. El medio interestelar . . . 91
4.2.2. Formación . . . 93
4.2.3. Estrellas fallidas . . . 95
4.2.4. Secuencia principal . . . 95
4.2.5. Etapas post-secuencia principal . . . 97
4.2.6. Últimas fases de la evolución estelar . . . 101
4.2.6.1. Enanas blancas - nebulosas planetarias . . . 101
4.2.6.2. Supernovas hidrodinámicas . . . 103
4.2.6.3. Estrellas de neutrones y púlsares . . . 108
4.2.6.4. Hipernovas . . . 110
4.2.6.5. Agujeros negros estelares . . . 110
4.3. Bibliografía del capítulo . . . 112

5. Astronomía planetaria **113**

5.1. Sistema solar . . . 114
5.1.1. Ampliando el sistema solar . . . 115
5.1.2. Mitología de los dioses que dan nombre a los planetas . . . 118
5.1.3. Planetas: definición y clasificación . . . 121
5.1.4. La Tierra, un modelo de planeta rocoso . . . 123
5.1.4.1. Movimientos de la Tierra . . . 124
5.1.4.2. Estructura interna de la Tierra . . . 125
5.1.4.3. La tectónica de placas . . . 128

5.1.4.4. La atmósfera terrestre 131
5.1.4.5. Campo magnético terrestre 135
5.1.5. Planetas rocosos 137
5.1.5.1. Atmósferas 138
5.1.5.2. Superficies 146
5.1.5.3. Interiores 149
5.1.6. Planetas gigantes 151
5.1.6.1. Anillos 151
5.1.6.2. Atmósferas y magnetósferas 152
5.1.6.3. Interiores 154
5.1.7. Planetas enanos 155
5.1.8. Satélites 158
5.1.8.1. Luna 159
5.1.8.2. Fobos y Deimos 161
5.1.8.3. Satélites galileanos 162
5.1.8.4. Titán 164
5.1.8.5. Encelado 167
5.1.8.6. Tritón 167
5.1.9. Cuerpos menores 168
5.1.9.1. Asteroides 168
5.1.9.2. Objetos del cinturón de Kuiper 170
5.1.9.3. Cometas 171
5.2. Formación del sistema solar 175
5.2.1. Formación de planetas gigantes 177
5.2.2. Formación de planetas rocosos 178
5.3. Exoplanetas 179
5.3.1. Métodos de búsqueda de exoplanetas 182
5.3.1.1. Movimiento en torno del centro de masas 182
5.3.1.2. Fotometría 184
5.3.1.3. Microlentes gravitacionales 185
5.3.1.4. Observación directa 185
5.3.2. Diversidad exoplanetaria 186
5.3.2.1. HD 209458 b 189
5.3.2.2. Supertierras 189
5.3.2.3. Sistema Upsilon Andromedae 191
5.3.2.4. Planetas en la zona habitable 192
5.3.2.5. Exoplanetas retrógrados 193
5.4. Revisión del modelo de formación planetaria 193
5.5. Bibliografía del capítulo 194

6. Bioastronomía **197**
6.1. Introducción 198
6.2. Moléculas orgánicas en el espacio interestelar 199
6.3. El origen de la vida en la Tierra 199
6.3.1. Reseña histórica 200
6.3.2. Génesis 201
6.3.3. Química prebiótica 205

6.3.4. Cometas, meteoritos y el origen de la vida . . . 207
6.3.5. El mundo del ARN . . . 208
6.3.6. Orígenes de las primeras membranas . . . 210
6.3.7. Orígenes de los primeros seres vivos . . . 212
6.4. Panspermia . . . 213
6.4.1. Evidencias y mecanismos . . . 215
6.5. Principio antrópico . . . 217
6.5.1. Principio antrópico débil . . . 217
6.5.2. Principio antrópico fuerte . . . 218
6.6. Vida en ambientes extremos . . . 220
6.7. Habitabilidad planetaria . . . 222
6.8. Búsqueda de vida extraterrestre . . . 224
6.8.1. Ovnis, extraterrestres y ufología . . . 225
6.8.2. Búsqueda de vida en el sistema solar . . . 226
6.8.2.1. Búsqueda de vida en Marte . . . 226
6.8.2.2. Titán: una posible Tierra prebiótica . . . 230
6.8.2.3. Búsqueda de vida en Europa . . . 230
6.8.2.4. Búsqueda de vida en Encelado . . . 232
6.8.3. Búsqueda de inteligencia extraterrestre . . . 232
6.8.3.1. La ecuación de Drake . . . 232
6.8.3.2. El proyecto SETI . . . 234
6.8.3.3. Misiones no tripuladas . . . 237
6.8.4. Búsqueda de vida en exoplanetas . . . 238
6.8.4.1. Biomarcadores en la atmósfera terrestre . . . 238
6.8.4.2. Búsqueda de biomarcadores en atmósferas de exoplanetas 242
6.9. Bibliografía del capítulo . . . 244

IV Apéndices **I**

A. Glosario **III**

B. Elementos de ondas **VII**
B.1. Ondas armónicas . . . VIII
B.1.1. Características de las ondas armónicas . . . VIII
B.1.1.1. Características de las ondas armónicas transversales . . . VIII
B.1.1.2. Características de las ondas armónicas longitudinales . . . IX
B.2. Efecto Doppler . . . X
B.2.1. Efecto Doppler en ondas de sonido . . . XI
B.2.2. Efecto Doppler en ondas electromagnéticas . . . XI
B.3. Principio de Huygens . . . XII
B.4. Transición entre dos medios . . . XII
B.5. Fenómenos por superposición de ondas . . . XIII
B.5.1. Difracción . . . XIII
B.5.2. Polarización . . . XIV
B.5.2.1. Polarización lineal . . . XIV
B.5.2.2. Polarización circular y elíptica . . . XIV
B.5.3. Interferencia de dos ondas armónicas coherentes . . . XV

B.5.4. Ondas estacionarias XVI
B.5.4.1. Ondas estacionarias en una cuerda XVI
B.5.5. Pulsaciones XVII
B.5.5.1. Características de las pulsaciones XVIII
B.6. Ondas sonoras XVIII
B.6.1. Mecanismo de formación de las ondas sonoras XIX
B.7. Bibliografía del capítulo XIX

C. Materia y radiación **XX**
C.1. Teoría de la luz XX
C.2. Teoría de la materia XXIV
C.2.1. Primeros modelos atómicos XXIV
C.2.2. Ondas de materia XXVI
C.2.3. Modelo cuántico del átomo XXVII
C.2.3.1. Orbitales atómicos XXVII
C.2.3.2. El núcleo atómico XXX
C.2.4. Decaimiento radiactivo XXXII
C.3. Organización de la materia XXXIV
C.3.1. La tabla periódica XXXIV
C.3.2. Moléculas y enlaces XXXVI
C.4. Bibliografía del capítulo XXXVII

D. Elementos de química orgánica y bioquímica **XXXVIII**
D.1. Hidrocarburos XXXVIII
D.1.1. Radicales libres XXXIX
D.2. Aminoácidos XXXIX
D.2.1. Puentes de hidrógeno XLII
D.2.2. Enlace peptídico XLIII
D.3. Proteínas XLIV
D.3.1. Estructura primaria XLV
D.3.2. Estructura secundaria XLV
D.3.2.1. Alfa hélices XLV
D.3.2.2. Conformación beta XLV
D.3.3. Estructura terciaria XLVI
D.3.4. Estructura cuaternaria XLVI
D.4. Las proteasas XLVI
D.5. Ácidos nucleicos XLVIII
D.5.1. Bases nitrogenadas XLVIII
D.5.2. Ácido ribonucleico XLVIII
D.5.3. Ácido desoxirribonucleico XLIX
D.6. Virus L
D.7. Bibliografía del capítulo LII

Epílogo **a**

Índice Alfabético **c**

Parte II

De las estrellas a la vida

Capítulo 4

Elementos de astronomía estelar



Objetivos de aprendizaje

Objetivos generales

- Identificar los diferentes tipos de cuerpos que componen el sistema solar, la Vía Láctea y el Universo.
- Comprender, de forma elemental, procesos físicos que ocurren en las estrellas.

Objetivos específicos

- Conocer y comprender la estructura, composición química, la generación y transmisión de la energía en el Sol.
- Describir la actividad solar y comprender la influencia que esta ejerce sobre nuestro planeta y los posibles riesgos para la sociedad tecnológica en que vivimos.
- Identificar las causas de la actividad solar y relacionarlas con el ciclo solar.
- Explicar cómo se obtiene información científica del Sol.
- Describir los procesos físicos que conllevan la formación de estrellas.
- Comprender la evolución de una estrella poco masiva, de una estrella tipo solar, y de una estrella mucho más masiva que el Sol.
- Reconocer los últimos estados evolutivos de los diversos tipos de estrellas.

Temas

- El Sol.
- Las estrellas

4.1. El Sol

Las estrellas son cuerpos celestes capaces de generar energía e irradiarla al espacio circundante. El Sol es la estrella más cercana a la Tierra, y da nombre al sistema planetario asociado a ella, el *sistema solar*.

Debido a lo anterior, resulta natural que el estudio del Sol sea de vital importancia, ya que nos permitirá aplicar ese conocimiento al estudio de otras estrellas.

El radio del Sol es de $R_\odot \approx 696\,000$ [km], esto es, cerca de 109 veces el radio de la Tierra. La razón de tamaños se puede obtener a través de la razón de volúmenes:

$$\frac{V_\odot}{V_T} = \frac{\frac{4}{3}\pi R_\odot^3}{\frac{4}{3}\pi R_T^3} = \left(\frac{R_\odot}{R_T}\right)^3$$

Por lo que:

$$V_\odot = \left(\frac{R_\odot}{R_T}\right)^3 V_T = (109)^3\, V_T \approx 1{,}3 \cdot 10^6\ V_T$$

De esta forma, resulta que *¡el Sol es aproximadamente 1,3 millones de veces más grande que la Tierra!*

Visto desde la Tierra, el Sol que es tremendamente más grande que ella, solo se ve de un diámetro angular de 32 minutos de arco, muy similar al de la Luna. Conociendo el diámetro solar $(2 \cdot R_\odot)$ se puede calcular que para que tenga el mismo tamaño aparente que la Luna, el Sol debe estar unas 400 veces más lejos.

4.1.1. Generación de energía

En 1938 el físico *Charles Critchfield* (1910 - 1994) descubrió que en el choque entre dos protones a alta velocidad, puede ocurrir que uno pierda su carga positiva y se convierta en un neutrón, este proceso es denominado *decaimiento beta inverso*. Durante la colisión, la fuerza nuclear (ver Apéndice C) actúa permitiendo que éstos permanezcan unidos formando un *deuterón*[1], es decir, un núcleo de hidrógeno pesado. Este deuterón combinado de diversas formas con un núcleo de hidrógeno forma un núcleo de helio. El proceso por el cual varios núcleos atómicos de carga similar se unen y forman un núcleo más pesado es denominado *fusión nuclear*. En el caso de los procesos en el interior de las estrellas, la fusión ocurre debido a altas temperaturas, por lo que suele denominarse *fusión termonuclear*. El proceso de fusión termonuclear del hidrógeno descrito anteriormente, se llama *protón-protón*.

Este núcleo de helio posee una masa levemente inferior a la suma de las masas de los núcleos de hidrógeno que lo formaron. La diferencia de masa (Δm) es transformada en energía. La cantidad de energía generada se puede conocer gracias a la famosa ecuación de la *teoría especial de la relatividad*, propuesta por Albert Einstein en 1905 y que nos da la equivalencia entre masa y energía:

$$\Delta E = c^2 \cdot \Delta m$$

Donde: ΔE es la energía generada; Δm es la masa transformada y c^2 es una constante

[1]Resulta interesante que la matemática asociada a los estados de las partículas, la teoría de grupos, prediga que no es posible la existencia de núcleos compuestos solo de neutrones.

de proporcionalidad. c es la rapidez de la luz en el vacío ($\sim 3 \cdot 10^8$ [m/s]). Dado que c^2 ($\sim 9 \cdot 10^{16}$) es un número extremadamente grande, una pequeña cantidad de masa equivale a una gran cantidad de energía. No existe otro mecanismo conocido que pueda explicar satisfactoriamente la generación de energía en el Sol.

El proceso de fusión termonuclear que ocurre en el Sol permite irradiar una cantidad de energía por segundo de $L_\odot = 3,85 \cdot 10^{26}$ [W][2]. En astronomía se suele usar el término luminosidad en lugar de potencia.

De esta forma, la atmósfera exterior de la Tierra recibe unos 1.400 [W/m^2]. Esta cantidad es conocida como *constante solar*. Aproximadamente el 70 % de dicha cantidad penetra la atmósfera terrestre.

4.1.2. Composición química

Históricamente, la astrofísica nace a comienzos del siglo XIX con la observación realizada por *Joseph von Fraunhofer* (1787 - 1826) de que la luz del Sol, al atravesar un espectroscopio[3], no solo se descompone de forma continua en sus colores componentes (espectro continuo), como ocurre en la formación del arco iris, sino que también aparecen líneas oscuras, denominadas *líneas espectrales de absorción* (ver Apéndice C). Fraunhofer catalogó 475 de estas líneas, las hoy denominadas líneas de Fraunhofer (figura 4.1).

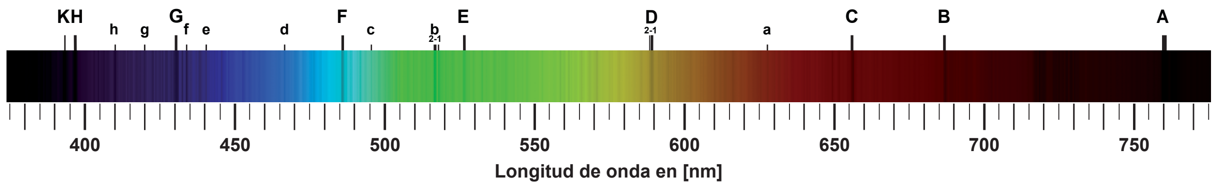


Figura 4.1: El espectro solar. Se han indicado algunas de las líneas de Fraunhofer.

En 1860 *Robert Bunsen* (1811 - 1899) y *Gustav Kirchhoff* (1824 - 1887) publican: "*Análisis químico por observaciones espectrales*", en el cual se expone la idea que cada elemento produce un patrón de líneas que pueden ser determinados de forma experimental en el laboratorio y de esta forma identificar las líneas de los espectros de cuerpos celestes.

El estudio de las líneas espectrales, entrega información valiosa de la composición química de los gases que ha atravesado la radiación desde su lugar de emisión. Estudiando dichos espectros del Sol (figura 4.1), se han identificado más de 70 elementos químicos.

Un caso notable de identificación de elementos a través de líneas espectrales ocurre en 1868; Sir *Norman Lockyer* (1836 - 1920) observó fuertes líneas amarillas en el espectro solar que no se habían visto nunca en experimentos en el laboratorio. Dedujo que debía tratarse de un elemento desconocido, al que llamó helio, por el nombre griego del Sol. Este elemento no se detectó de forma concluyente en la Tierra hasta 25 años después.

La composición química del Sol, conocida a través de la espectroscopía, indica que ésta es, un 72 % de hidrógeno, 26 % helio y 2 % de otros elementos. Dado que las reacciones termonucleares ocurren solo en el núcleo del Sol, esta composición química es prácticamente la misma que cuando el Sol se formó. En el núcleo las reacciones termonucleares han convertido hidrógeno en helio, se estima que allí cerca del 38 % de la masa total es de helio.

[2]W representa la unidad Watts.

[3]Un espectroscopio es un dispositivo que descompone la luz en sus colores componentes tal como ocurre durante la formación de un arcoiris.

Ningún elemento conocido puede sobrevivir como sólido o líquido a las altas temperaturas solares, así el Sol está compuesto por gases que, debido a estas elevadas temperaturas, se encuentran *ionizados*. Cuando la materia se encuentra en estas condiciones se dice que ha alcanzado su *cuarto estado*, el *plasma*. En la Tierra es posible encontrar frecuentemente plasmas. Por ejemplo, en el interior de tubos fluorescentes la materia se encuentra en este estado, también los rayos de las tormentas eléctricas son de plasma. Existe una rama de la física llamada *física de plasmas*, que estudia la materia en estas condiciones. Para el estudio de la astrofísica estelar es necesario hacer uso de una rama de la física de plasmas conocida como *magnetohidrodinámica*.

4.1.3. Estructura

La superficie aparente del Sol es llamada *fotósfera* (del griego "bola de luz") y nos permite dividir al Sol en una región interna no visible y una externa transparente conocida como *atmósfera solar*.

4.1.3.1. Estructura interna del Sol

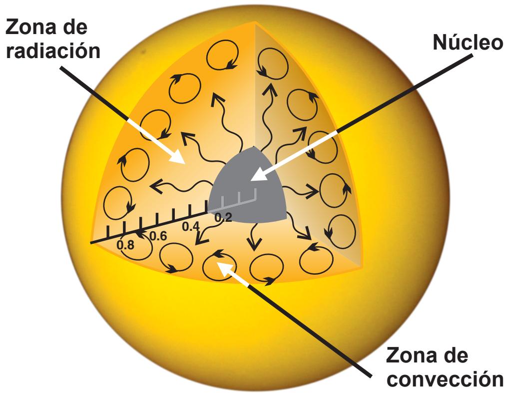
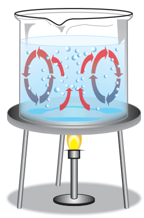


Figura 4.2: Estructura interna del Sol.

La región más interna es denominada núcleo, y ocupa aproximadamente un cuarto del radio solar y es allí donde ocurren las reacciones termonucleares. Su temperatura es de unos dieciséis millones de Kelvin[4] ($1{,}6 \cdot 10^7$ [K]), la densidad en el centro es de 160 veces la densidad del agua ($\rho_{H_2O} \approx 10^3$ [kg/m^3]). En el borde exterior del núcleo la densidad es de cerca de 20 veces la densidad del agua. La energía generada en el núcleo es transmitida por la capa siguiente principalmente por radiación: los fotones son absorbidos repetidamente y re-emitidos a energías más bajas. De esta forma, los fotones viajan lentamente hacia fuera en esta capa, denominada *zona de radiación*. La zona radiativa se extiende hasta cerca del 80 % del radio solar. Su temperatura media es de ocho millones de Kelvin ($8 \cdot 10^6$ [K]). En el restante 20 % del radio solar, la energía es transmitida a la superficie principalmente por *convección*, es decir, a través de transporte físico de materia, en la denominada *zona de convección*.


Figura 4.3: Experimento para ver la convección.

En la vida cotidiana es posible observar un proceso convectivo al calentar el agua. Consideremos un recipiente transparente que contiene agua y que la fuente de calor se ubica debajo, para observar mejor el proceso, se puede poner una pastilla colorante en el fondo del recipiente. Lo que se observa

[4]La equivalencia entre Kelvin y grados Celsius, es:

$$T\ [\mathrm{K}] = T\ [^\circ\mathrm{C}] + 273{,}16$$

Aunque para temperaturas altas (del orden de miles de Kelvin) se puede considerar que:

$$T\ [\mathrm{K}] \approx T\ [^\circ\mathrm{C}]$$

es que el agua más próxima a la fuente de calor, que se calienta primero, asciende por el centro. Una vez que llega a la superficie, se difunde por ella y baja por los costados, repitiéndose continuamente el proceso. De esta forma, la energía se transporta a toda el agua contenida en el recipiente.

La energía generada en el núcleo, puede demorar varios millones de años para llegar a la superficie y escapar del Sol.

4.1.3.2. Estudio del interior del Sol

Aunque no es posible observar directamente el núcleo del Sol, la teoría de nucleosíntesis de helio, predice la producción de *neutrinos*, partículas de masa ínfima cuya principal característica es que la materia les es casi transparente, es decir, interactúan muy débilmente con la materia pasando libremente a través de ella. Así los neutrinos producidos en el núcleo, deberían salir libremente y casi sin oposición desde el núcleo del Sol.

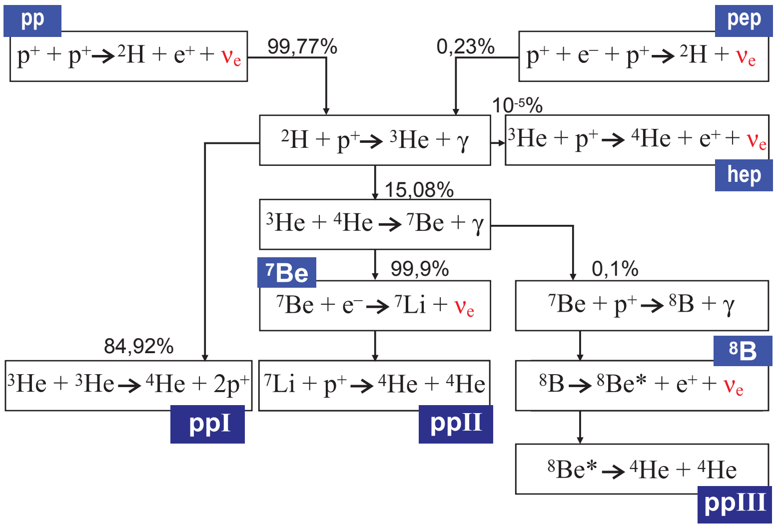


Figura 4.4: Nucleosíntesis del helio en el interior del Sol. γ representa un fotón y ν_e representa un neutrino solar. Créditos: Dorottya Szam.

Observando los neutrinos solares podemos corroborar los modelos teóricos. El problema es que la facilidad con que escapan del Sol, es justamente una desventaja cuando los queremos observar, pues es extremadamente difícil hacerlos interactuar con la materia. Por ello, se han construido enormes piscinas de agua pesada[5] bajo la superficie de la Tierra con el fin de observar cuando un neutrino interactúe con dicha agua, pero el número de neutrinos detectados ha sido menor que el número predicho por la teoría, esta situación es conocida como el *problema de los neutrinos solares*.

Existen tres variedades de neutrinos, el *neutrino electrón*, el *neutrino muón* y el *neutrino tauón*. Las estrellas solo producen el neutrino electrón (ν_e). En 1998 se descubrió que los neutrinos pueden cambiar de tipo en los rayos cósmicos.

Desde el año 2001 los físicos creen haber resuelto el problema de los neutrinos solares, gracias a la puesta en operaciones del *Sudbury Neutrino Observatory* (SNO), el cual observa las dos variedades más exóticas de los neutrinos; el neutrino muón y el neutrino tauón. Las observaciones indi-

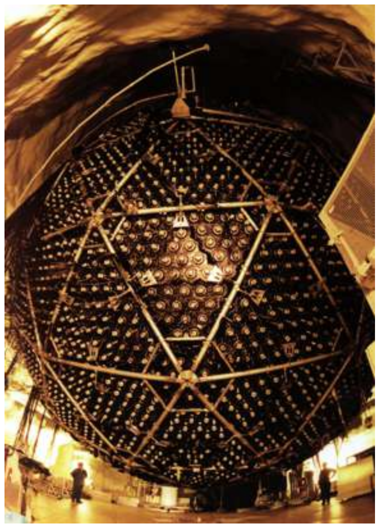


Figura 4.5: Detector subterráneo de neutrinos del SNO (Sudbury Neutrino Observatory). Créditos: Roy Kaltschmidt, Lawrence Berkeley National Laboratory.

[5]El agua pesada, es una molécula cuya composición química es la misma que el agua, pero cuyos átomos de hidrógeno, son deuterio, los isótopos pesados de hidrógeno.

can que los neutrinos electrones faltantes pueden ser explicados a través de "*oscilaciones*", es decir, los neutrinos electrones cambiarían a las otras dos variedades. Las observaciones serían congruentes en número con los neutrinos electrones faltantes predichos en la teoría de la nucleosíntesis solar.

Otra forma de estudiar el interior del Sol es analizando las oscilaciones globales de la superficie. En 1962 se descubrió que la superficie solar oscilaba "hacia afuera" y "hacia adentro", esto es, pulsaba con frecuencias cercanas a los 3 [mHz] (miliHertz). El origen de estas oscilaciones sería producto de la convección: en la zona de convección las burbujas ascienden a velocidades del orden de la del sonido en el aire (~ 340 [m/s]), sin embargo, el plasma desciende a velocidades menores produciendo ondas de presión o ruido. Algo similar sucede en el agua hirviente, generando ondas de presión llamadas ondas acústicas resonantes. Estas ondas se propagan por el interior del Sol y se reflejan en la fotósfera, produciendo las oscilaciones observadas. En realidad, las ondas sonoras son reflejadas dentro del Sol y refractadas hacia afuera, varias veces entre diferentes subcapas de la fotósfera.

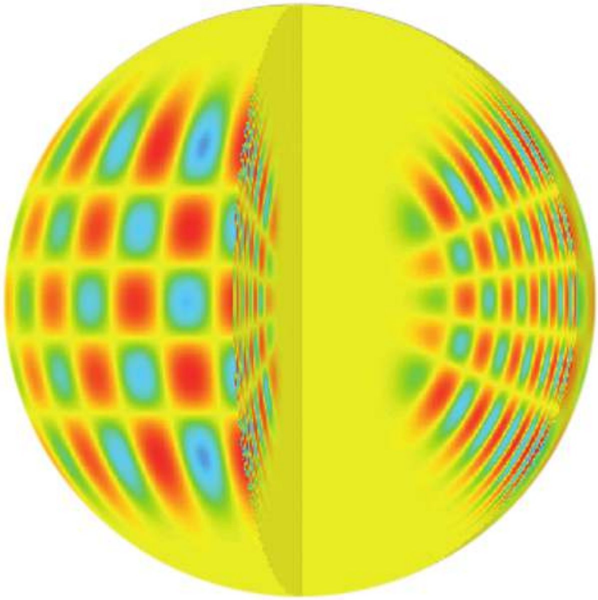


Figura 4.6: Representación gráfica de ondas de resonancia acústica en el interior de estrellas tipo solar, los colores rojo y azul representan desplazamientos en direcciones opuestas. Créditos: European Southern Observatory (ESO).

Las frecuencias y amplitudes observadas permiten a los astrónomos obtener valiosa información del interior del Sol, como densidad, temperatura y velocidad de rotación en el interior del Sol.

La *heliosismología* es el estudio de la estructura y condición interna del Sol mediante la medición de estas oscilaciones que son observadas espectroscópicamente a través del *desplazamiento Doppler* en ciertas líneas espectrales (ver Apéndice B).

Al igual que el Sol, otras estrellas también deben tener estas oscilaciones. La *astrosismología*, es la rama de la astrofísica que estudia pequeñas oscilaciones en estrellas. Desde el año 2001, usando las técnicas que se utilizan para descubrir planetas extrasolares, se ha logrado observar estas oscilaciones en otras estrellas, por ejemplo *Alpha Centauri A*. Las pulsaciones en la superficie producen pequeños desplazamientos en los espectros. Las oscilaciones detectadas son del orden de 35 [cm/s]. Esto representa variaciones de 40 [m] en el radio de 875.000 [km] de la estrella. Estas observaciones realimentan y están en completo acuerdo con los modelos teóricos, permitiendo mejorar las estimaciones de masa, radio, edad, composición química y otras propiedades de la estrella.

4.1.3.3. La atmósfera solar

A diferencia del interior del Sol, la atmósfera es accesible a la observación directa.

La *fotósfera* es una delgada capa (comparada con el radio solar) de unos 620 [km] de espesor y es la capa visible y más interna de la atmósfera solar. Su temperatura es de unos 5.800 [K] y su densidad media es de $4 \cdot 10^{-4}$ [kg/m^3].

Al observar la fotósfera a través de un instrumento óptico, se evidencia que desde el centro y hacia los bordes se produce un oscurecimiento (figura 4.7). Este fenómeno, conocido como *oscurecimiento del limbo*[6], se debe a que la luz que recibimos del Sol proviene no solamente de las capas más altas de la fotósfera, sino también de capas más profundas. La luz que se observa en el centro del disco solar proviene principalmente de las capas más profundas de la fotósfera que son más calientes y más luminosas, en cambio la luz de las zonas cercanas al limbo proviene de las capas más altas de la fotósfera, que son más frías y emiten con menor intensidad.



Figura 4.7: Fotografía de la fotósfera solar obtenida en el observatorio astronómico de la Universidad Complutense de Madrid. Se puede observar el fenómeno del oscurecimiento del limbo y unas pocas manchas solares.

También en la fotósfera se pueden observar zonas oscuras, denominadas *manchas solares*. Las primeras observaciones del disco solar fueron registradas por los chinos cerca del año 800 a. de C., quienes lograron observar estas manchas oscuras a través de las nubes. En el mundo occidental fue *Galileo Galilei* quien observando sistemáticamente el Sol, redescubrió las manchas solares, y gracias a ellas concluyó que el Sol debía rotar sobre su propio eje.

Las manchas solares son zonas relativamente frías respecto del resto de la fotósfera. Normalmente aparecen en pares y pueden durar desde unas pocas horas hasta varios meses, sus tamaños típicos son del orden del diámetro de la Tierra, aunque pueden alcanzar tamaños de hasta 10 veces mayores. Poseen un núcleo llamado *umbra* de unos 4.000 [K] y una parte gris exterior llamada *penumbra* (ver figura 4.8) de algunos cientos de grados más fría que la fotósfera.

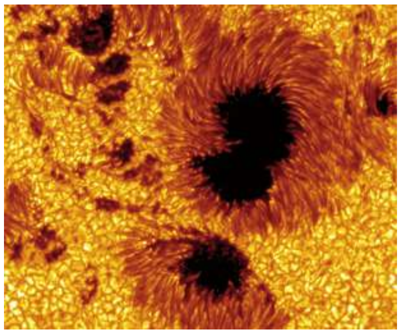


Figura 4.8: Manchas solares en la fotósfera. Se observa el núcleo o umbra y la parte gris exterior conocida como penumbra. Créditos: Göran Scharmer & Mats Löfdahl, Real Academia de Ciencias de Suecia.

La observación de las manchas permite evidenciar que la rotación del Sol es, al igual que la Tierra, de Oeste a Este, pero a diferencia de ella, que es un sólido rígido, no rota a la misma rapidez en diferentes latitudes y profundidades, es decir, posee *rotación diferencial*. El período de rotación es menor en el ecuador solar que en los polos, siendo éstos de cerca de 25 y 35 días respectivamente.

Al observar la fotósfera con un filtro que atenúe la cantidad de luz, conocidos como filtros de luz blanca, es posible observar una apariencia granulosa (figura 4.9). Los *gránulos* poseen hasta 1.000 [km] de diámetro y son producidos por las corrientes convectivas de plasma que transportan la energía a la fotósfera. Los gránulos están separados por finas líneas oscuras. Se pueden observar gránulos más brillantes, esto se debe a que ellos son levemente más calientes (unos 300 °C), siendo las zonas más oscuras, corrientes descendentes de plasma más frío. Los gránulos individuales duran en promedio unos 5 minutos cada uno.

[6] El limbo es el aparente borde o contorno de un astro, en este caso del disco solar.

Los gránulos forman estructuras mayores llamados *supergránulos* de hasta 30.000 [km], los que pueden durar incluso varias horas y poseen, además de las corrientes convectivas, flujos de plasma desde sus centros a sus bordes.

Existen también manchas de color blanco, que se encuentran asociadas de las manchas solares, y se denominan *fáculas* (del latín "pequeñas antorchas"). Las fáculas son más visibles cerca del limbo y el mayor brillo sería producto que las temperaturas de dichas regiones son unos 200 a 300 [K] más altas que su en torno.

En las cercanías del limbo solar es posible observar, en ciertas ocasiones, arcos de gases ionizados, denominados *prominencias* (figura 4.10), las que pueden durar semanas o incluso meses y ascienden a decenas de miles de kilómetros de altura.

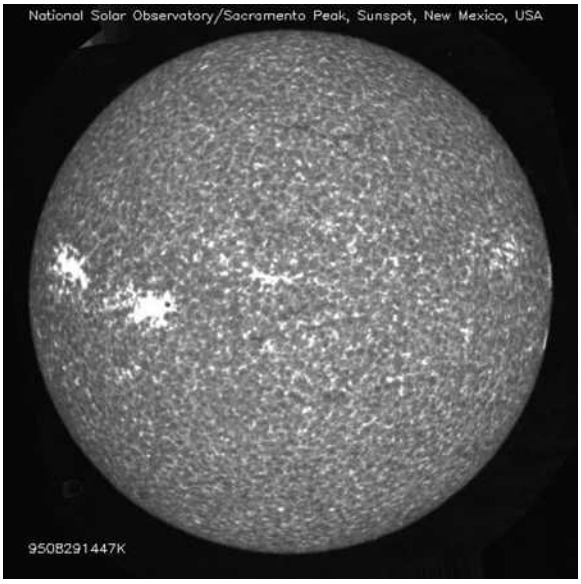


Figura 4.9: Granulación de la fotósfera. Créditos: National Solar Observatory/AURA/NSF.

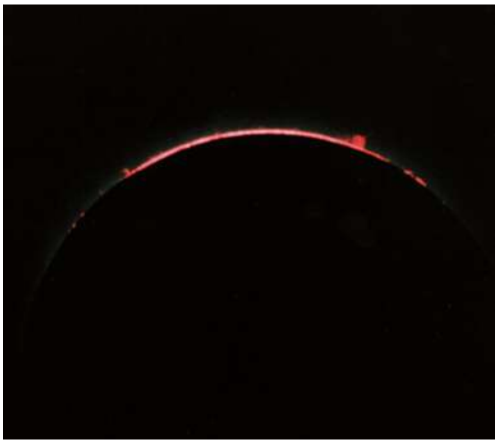
Inmediatamente sobre la fotósfera se encuentra la *cromósfera* (del griego "bola de colores"), su espesor es de unos 1.570 [km].

Desde la Tierra, la cromósfera es visible, sin la ayuda de filtros especiales, sólo durante un eclipse total de Sol (figura 4.11), la cual se observa de color rojo gracias a la ionización del hidrógeno.

Alrededor de los bordes de los supergránulos, suben hacia la cromósfera chorros de gas de hasta 10.000 [km] de altura y 1.000 [km] de ancho, conocidos como *espículas* (figura 4.12). Éstas estructuras cambian rápidamente y duran entre 5 a 15 minutos.



Figura 4.10: Una prominencia en las cercanías del limbo solar. Créditos: Big Bear Observatory, Caltech.



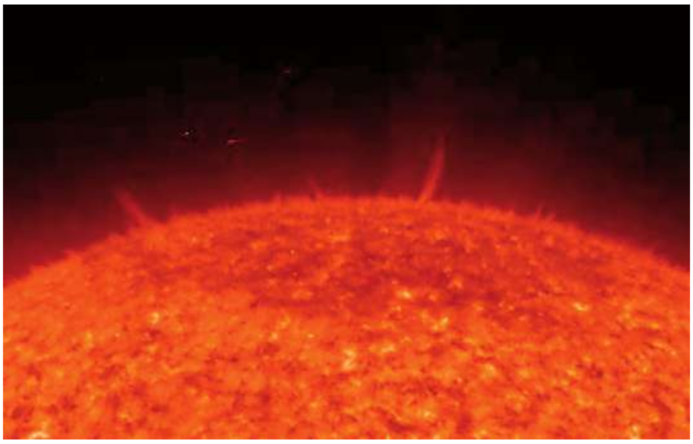


Figura 4.11: Izquierda: La cromósfera observada en un eclipse de Sol. Imagen J. C. Casado © tierrayestrellas.com.

Figura 4.12: Derecha: Imagen del Sol que muestra miles de espículas que se extienden a través de la cromósfera. Créditos: SOHO (ESA & NASA).

La temperatura aumenta inesperadamente a través de la cromósfera, alcanzando cerca de 10.000 [K] en su parte más externa, su densidad media es de $8 \cdot 10^{-5}$ [kg/m^3].

La tenue capa más externa es denominada *corona*. Su densidad es de cerca de 10^5 [partículas/cm^3] ($\sim 10^{-14}$ [atm]) y su extensión es de varios millones de kilómetros y su temperatura alcanza hasta 2 millones de Kelvin lo que permite que irradie principalmente en longitudes de onda de rayos X. Desde la Tierra es visible solo durante un eclipse total de Sol, observándose como un halo blanco y dentado alrededor del eclipsado disco solar (figura 4.13).

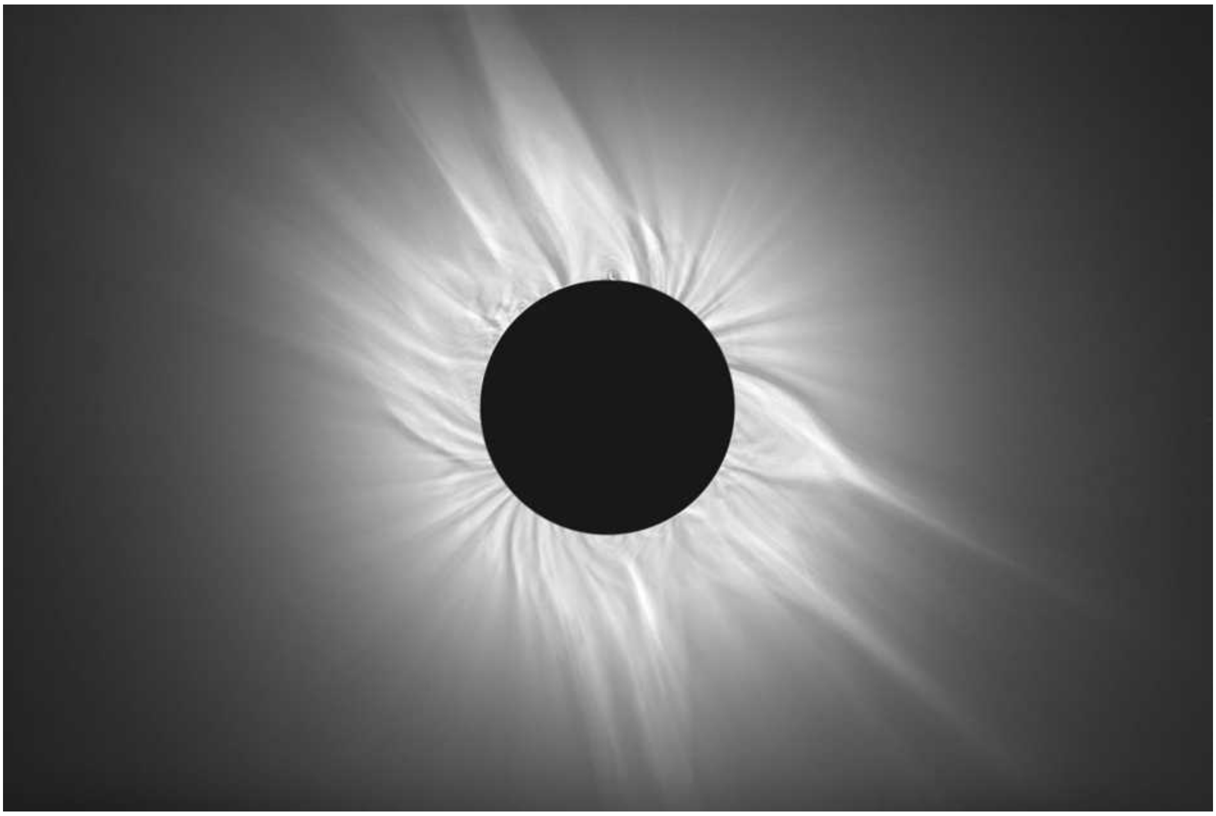


Figura 4.13: La corona observada en un eclipse de Sol. Créditos: Koen van Gorp.

Entre la relativamente fría cromósfera y la muy caliente corona hay una capa delgada e irregular denominada *zona de transición* que está dominada por el flujo de calor de la región caliente a la fría. Dentro de esta región la temperatura se eleva rápidamente de 10^4 [K] a $\sim 10^5$ [K]. Su alto gradiente térmico da una idea de la energía transportada.

No está completamente claro el sorpresivo aumento de temperatura desde la fotósfera; es posible, que en parte sea producido por *ondas magnetohidrodinámicas*. Las ondas magnetohidrodinámicas son ondas acústicas (ver Apéndice B) que al propagarse en presencia de un intenso campo magnético, se acoplan, es decir, a la oscilación de la materia se acopla

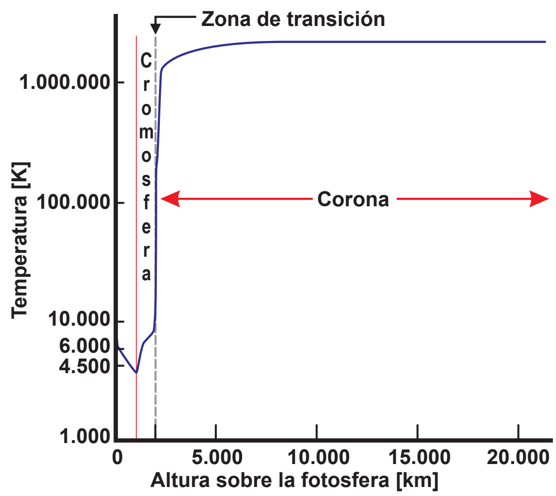


Figura 4.14: Gráfica de la temperatura de la atmósfera en función de la distancia sobre la fotósfera.

una oscilación del campo magnético. En el Sol, ondas acústicas se originan en la zona de convección, y al viajar hacia el exterior encuentran un medio menos denso, transformándose en *supersónicas*, esto es, que se propagan con velocidad mayor que el sonido en ese medio. Estas ondas supersónicas producen un *frente de choque* que entrega energía al medio, produciendo su calentamiento, en este caso de la corona, la que a su vez por *conducción* calentaría la zona de transición y la cromósfera. El calentamiento de la corona se podría producir también por *recombinaciones magnéticas* tipo *fulguraciones*, que estudiaremos más adelante.

4.1.4. Actividad solar

4.1.4.1. Ciclo de manchas solares

Entre 1826 y 1843 *Heinrich Schwabe* (1789 - 1875) interesado en la búsqueda de un planeta intramercurial (denominado Vulcano), observó sistemáticamente las manchas solares ante la posibilidad que alguna de ellas fuera el supuesto planeta en tránsito (ver Volumen I, sección 2.8). Después de más de una década de observaciones, encontró que el número de manchas crecía y disminuía en un ciclo casi regular, que duraba unos 11 años, este ciclo es denominado en la actualidad *ciclo de manchas solares*. Pese a que el ciclo es relativamente regular, en el siglo XVII, el Sol tuvo un período de 70 años prácticamente sin manchas, conocido como el *mínimo de Maunder*, en honor del astrónomo *Edward Maunder* (1851 - 1928). La ausencia de manchas comenzó en 1645 (solo 35 años después que Galileo hiciera las primeras observaciones de manchas) y terminó en 1715; en aquella época, los astrónomos que observaban al Sol, no encontraban más de una docena de manchas por año, en comparación con las miles que se observarían normalmente. El mínimo de Maunder coincidió con la parte más fría de la llamada *pequeña edad de hielo* durante la cual Europa y América del Norte sufrieron inviernos muy crudos. En la actualidad sigue sin explicación las causas de la ocurrencia de este mínimo.

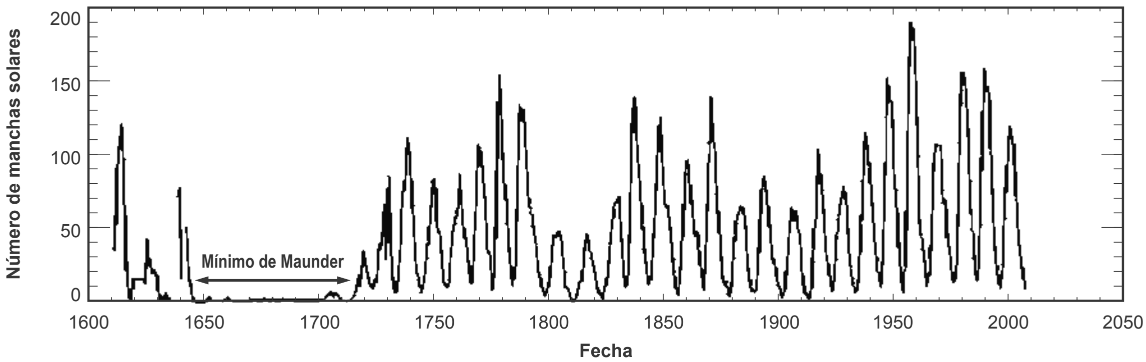


Figura 4.15: Gráfica del promedio anual del número de manchas solares en los últimos 400 años. Entre 1645 y 1715 sólo se observaron unas 50 manchas en lugar de las entre 40.000 y 50.000 manchas típicas, a esta zona de la gráfica se le conoce como el mínimo de Maunder. Fuente: http://ciencia.nasa.gov/

Más recientemente, el último mínimo comenzó el año 2006 y se extendió más de lo esperado hasta el 2009, y aunque no es la primera vez que los mínimos se prolongan más de lo común, en esta ocasión fue el mayor del último siglo. Se ha observado que cuando el Sol tiene menos manchas, su atmósfera irradia menos, mostrando además debilidad en su campo magnético global.

4.1.4.2. Fulguraciones

En las zonas que encierran grupos complejos de manchas, denominadas *regiones activas*, los campos magnéticos son más intensos. Ocasionalmente pueden ocurrir violentas erupciones que lanzan grandes cantidades de partículas energéticas hacia la corona. Estas erupciones son más frecuentes y violentas durante los períodos de abundantes manchas solares. Estas *erupciones solares* producen en forma repentina grandes emisiones de radiación electromagnética y de partículas energéticas de alta velocidad (electrones, protones y núcleos atómicos), con duraciones entre 10 y 30 minutos.

Las erupciones solares, se denominan también *llamaradas* o *fulguraciones*, son fenómenos muy energéticos, la energía liberada, puede llegar a equivaler a la que se utiliza en la Tierra en 100.000 años, o la producida por mil millones de bombas de hidrógeno que explotaran simultáneamente. La temperatura en la fulguración puede alcanzar los 5 millones de grados, esto es, cercano al doble de la temperatura de la corona.

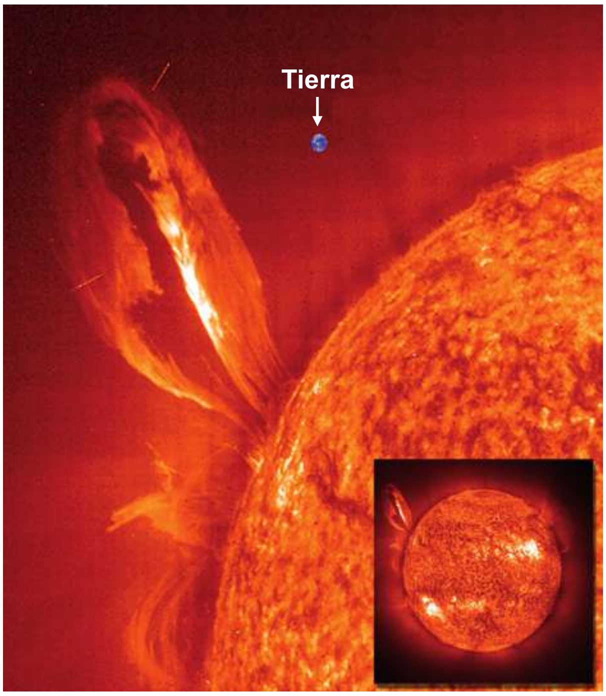


Figura 4.16: La imagen muestra una gran llamarada solar, se muestra la Tierra sobrepuesta para poder comparar sus dimensiones. Créditos: SOHO (ESA & NASA).

Los rayos gamma, X y ultravioleta provenientes de las fulguraciones llegan a la Tierra en solo 8 minutos, calentando la atmósfera, produciendo su expansión. Esta aumenta la fricción sobre los satélites de bajas órbitas, e incluso durante períodos de máxima actividad solar los satélites pueden ser desviados de sus órbitas y ser destruidos al entrar nuevamente en la atmósfera.

Las partículas, por su parte, llegan algunas horas o días más tarde y si la Tierra no fuera protegida por su atmósfera y su campo magnético, podrían destruir toda la vida del planeta.

Las partículas que interactúan con el campo magnético terrestre pueden causar tormentas atmosféricas, tormentas eléctricas, problemas en los compases magnéticos, aumentos de energía en las líneas telefónicas y eléctricas e incluso apagones.

Dado que las fulguraciones solares pueden afectar directamente la vida moderna, los astrónomos solares monitorean la actividad solar diariamente, sin embargo, las fulguraciones no pueden ser previstas aún.

4.1.4.3. Viento solar

Las partículas de la corona se mueven a grandes velocidades producto de las altas temperaturas, pudiendo éstas escapar de la gravedad solar. Este flujo de partículas energéticas eléctricamente cargadas es denominado *viento solar*. Aunque se le denomina viento, es mucho más rápido, poco denso y caliente que cualquier viento terrestre.

El viento solar proviene principalmente de los *agujeros coronales*, regiones en la corona solar donde los gases son mucho menos densos que en otras partes. Los campos magnéticos allí son relativamente débiles, permitiendo que escapen corrientes de viento solar de alta velocidad.

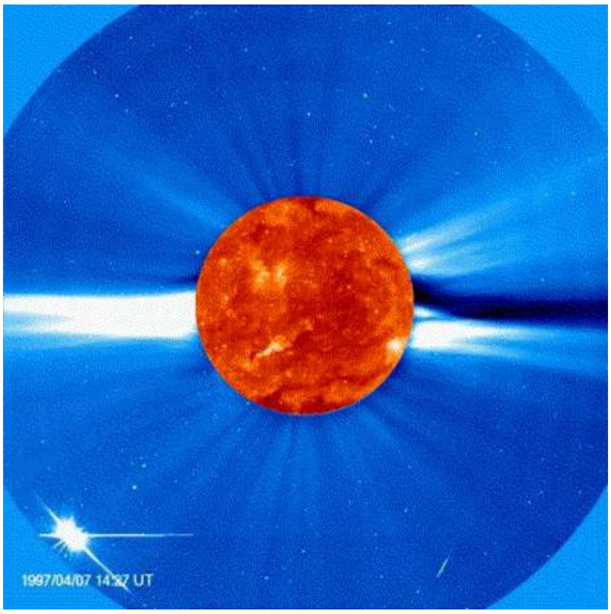


Figura 4.17: Una eyección de masa coronal fotografiada por el *SOHO*. Créditos: *SOHO* (ESA & NASA).

El viento solar es estudiado por instrumentos a bordo de naves espaciales fuera de la atmósfera terrestre. Cerca de la Tierra, la velocidad promedio del viento solar es de alrededor de 450 [km/s] y el tiempo de viaje desde el Sol es de aproximadamente 4 días.

Este plasma fluye desde el Sol en todo momento, aumentando con la actividad solar, cuando son visibles muchas manchas solares y durante las fulguraciones solares. Un caso extremo, relacionadas con la fulguraciones, son las denominadas *eyecciones de masa coronal*, estas son verdaderas burbujas magnéticas de partículas y radiación electromagnética, y pueden durar desde unos cuantos minutos hasta unas pocas horas, las más grandes.



Figura 4.18: La aurora austral fotografiada desde la Estación Espacial Internacional entre la Antártica y Australia el 10 de marzo de 2012. Créditos: André Kuipers, ESA/NASA.

El campo magnético de la Tierra y la atmósfera, nos protegen de los efectos dañinos del viento solar. Al llegar las partículas de alta energía del Sol a la atmósfera de la Tierra, pueden estimular los átomos atmosféricos y los iones para que irradien luz, provocando bandas espectaculares de luz denominadas *auroras*, y que son visibles en el cielo nocturno, principalmente alrededor de las regiones polares magnéticas de la Tierra, aunque ocasionalmente también alcanzan las regiones de latitudes medias. Dependiendo de donde se produzcan, son denominadas auroras boreales, o luces norteñas, y auroras australes, o luces sureñas. Durante las grandes emisiones de viento solar, pueden llegar a ser especialmente brillantes.

Las fulguraciones pueden llegar a ser peligrosas para la civilización tecnológica en la que vivimos. Por ejemplo, la gran erupción solar de 1989 dañó los paneles solares del satélite *GOES*, reduciendo en 6 años su vida operativa. Por otra parte, corrientes inducidas por

una tormenta geomagnética causaron el colapso de una planta completa en una central eléctrica en Quebec (Canadá), produciendo un apagón que afectó a 6 millones de personas durante más de 9 horas.

Una fulguración también puede interferir, durante unos pocos minutos, las ondas de radio usadas para las comunicaciones llegando incluso a extenderse por algunas horas. También la microelectrónica de satélites puede verse afectada, pues cuando los iones se estrellan a alta velocidad contra un satélite, algunos sistemas pueden conectarse o desconectarse, se pueden quemar los circuitos, y el material superconductor se puede degradar. Los astronautas y cosmonautas son especialmente vulnerables a las tormentas solares. La radiación de alta frecuencia y las partículas cargadas de alta velocidad son muy dañinas para las células, ya que tienen capacidad ionizante. Las radiaciones ionizantes pueden interrumpir el normal funcionamiento de las células. Los daños más severos ocurren cuando el ADN es afectado. Las caminatas espaciales dejan desprotegidos a los astronautas contra estas radiaciones. Aunque si bien es cierto que las paredes de las naves espaciales o estaciones espaciales ofrecen algún grado de protección, éstas no les protegen completamente.

4.1.4.4. Origen de la actividad solar

El Sol, al igual que la Tierra, posee un campo magnético que tiene globalmente, dos polos magnéticos. El eje magnético está inclinado 15° respecto del eje de rotación, y su intensidad es de aproximadamente 130 [Gauss][7]. El campo magnético del Sol se extiende a través del sistema solar hasta más allá de Plutón, a una distancia de alrededor de 6 mil millones de kilómetros.

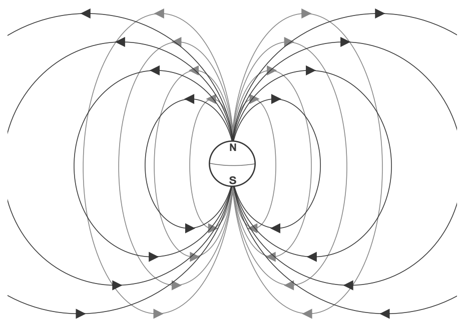


Figura 4.19: Líneas de campo magnético de un dipolo magnético perfecto; salen del polo Norte y entran por el Sur.

Los movimientos convectivos de las partículas eléctricamente cargadas que componen el plasma que circula en la zona convectiva, genera un complejo campo magnético solar que, producto de la rotación diferencial del Sol a lo largo del tiempo, se distorsiona y "tuerce". Muchos de los fenómenos solares están asociados con estos campos magnéticos torcidos.

Las manchas solares están íntimamente ligadas a los campos magnéticos; esto se evidencia incluso antes que se forme una mancha solar, con la aparición de una anomalía magnética. Los pares de manchas presentan polaridades magnéticas, una tendrá polaridad de un polo norte magnético y la otra de un polo sur magnético. La mancha que precede al grupo es denominada la *mancha guía*, y en un mismo hemisferio todas las manchas guías tienen la misma polaridad y opuesta a la del otro hemisferio (ver figura 4.20). Entre los pares de manchas, fluyen por sobre la fotósfera, chorros de plasma en forma de arcos denominados filamentos, los cuales al verlos sobre el limbo corresponden a las denominadas prominencias.

Los campos magnéticos también son los responsables de la subsistencia de las manchas solares. En una mancha las líneas de campo magnético son paralelas. Esta configuración es inestable, por lo que las líneas deberían separarse rápidamente, haciendo desaparecer

[7]La intensidad promedio del campo magnético terrestre es aproximadamente de 0,5 [Gauss].

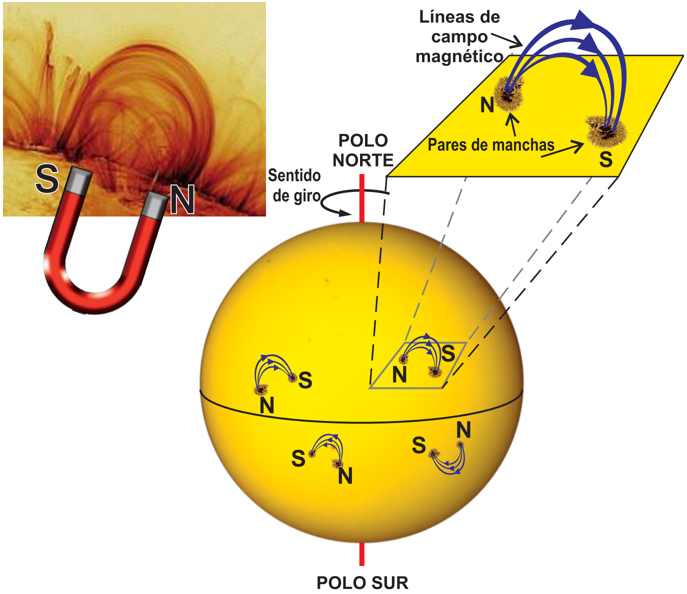
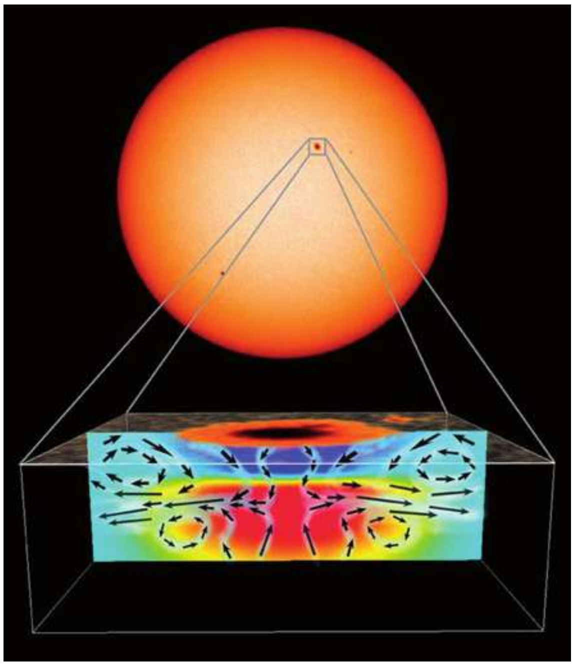


Figura 4.20: Los pares de manchas solares se comportan como un imán, con polaridades magnéticas opuestas.

las manchas, sin embargo, se observa que en algunos casos sobreviven por semanas.

En una mancha, la materia fluye hacia los bordes de la misma, pero esto solo ocurre en una delgada capa. Bajo la superficie fluye hacia el interior de la mancha (figura 4.21), impidiendo que parte de la energía proveniente del interior llegue a la superficie, y por lo tanto está más fría y oscura. A medida que el plasma se enfría, desciende rápidamente con velocidades del orden de 4.800 [km/h] arrastrando consigo el plasma de los alrededores y con él, el campo magnético que se concentra hacia el centro de la mancha solar, aumentando el enfriamiento, lo cual, a su vez, permite que masas adicionales de plasma se hundan, arrastrando plasma de sus alrededores. Este proceso produce un ciclo que se autoregenera. Mientras el campo magnético sea intenso, el efecto de enfriamiento producirá un flujo de plasma hacia el interior que mantendrá la estructura estable.

El flujo de material frío hacia abajo se disipa a la misma profundidad a la cual el flujo caliente en ascenso se separa. Este flujo bajo la superficie de las manchas solares también ayuda a explicar el aparente hecho paradójico que el Sol es ligeramente más caliente y brillante cuando está cubierto de manchas. Aún con las manchas, el calor sigue saliendo eficientemente.


Figura 4.21: Representación pictórica de los flujos de plasma debajo de una mancha solar. Se extienden solo unos cuantos miles de kilómetros en profundidad. Créditos: NASA/ESA.

Las ubicaciones de las manchas no son aleatorias: al principio del ciclo, luego de un mínimo de manchas, aparecen en latitudes altas, y a medida que el ciclo avanza, aparecen en las latitudes más bajas, y hacia el final del ciclo aparecen en las proximidades del ecuador, hasta que se alcanza el máximo, y comienzan a aparecer las primeras manchas del ciclo siguiente en latitudes altas. A esta variación en latitud de la aparición de manchas solares durante el ciclo solar se le conoce como *ley de Spörer*. La representación del área de la superficie manchada en función de la latitud para cada ciclo, proporciona un diagrama que se asemeja a las alas de una mariposa (figura 4.22), nombre con el cual se conoce a dicho

diagrama.

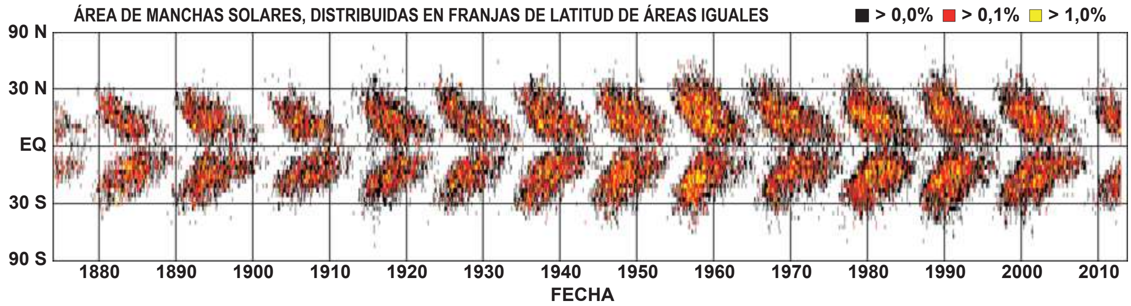


Figura 4.22: Observaciones detalladas de las manchas solares obtenidos desde 1874 en el Real Observatorio de Greenwich. Estas observaciones incluyen información sobre los tamaños y posiciones de las manchas solares, así como su número. Estos datos muestran que las manchas solares no aparecen al azar sobre el disco solar, sino que se concentran en dos bandas de latitud a ambos lados del ecuador. Créditos: Dr. David Hathaway, NASA/MSFC.

Las zonas más brillantes; las fáculas, también se deben a intensos y complejos campos magnéticos. La explicación del origen tanto de las fulguraciones como de las eyecciones de masa coronal es el fenómeno de reconexiones de las líneas de campo magnético de los arcos entre los pares de manchas, causadas por la reorganización de los campos magnéticos, al cerrarse estos arcos sobre la fotósfera forman burbujas que ascienden por la atmósfera solar.

El campo magnético solar se ve profundamente afectado por la rotación diferencial del Sol; en palabras simples, la rotación diferencial produce que las líneas de campo magnético se retuerzan (figura 4.23), este efecto aumenta con el tiempo lo cual produce progresivamente un colapso magnético, por lo cual comienzan aumentar las manchas, prominencias y llamaradas, y el viento solar se intensifica.

Al comenzar un nuevo ciclo, se observa que la polaridad de los pares de manchas se invierte respecto a la del ciclo precedente. Así, en un mismo hemisferio, una mancha guía de polaridad Norte será en el ciclo siguiente de polaridad Sur. Dado todo lo precedente podemos hacer la siguiente interpretación: luego de 11 años el colapso magnético se hace insostenible y la situación es salvada con la inversión de los polos magnéticos, lo que inicia de nuevo el ciclo, por lo que transcurridos 22 años se dice que se ha producido un "*ciclo solar*", pues se requiere de dos ciclos de manchas solares para que los polos vuelvan a su configuración original.

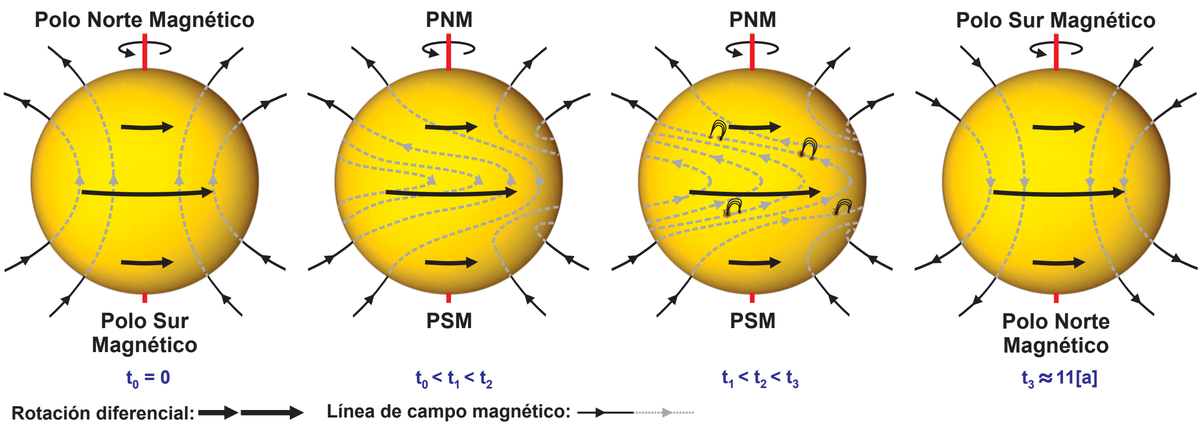


Figura 4.23: El campo magnético del Sol se tuerce producto de la rotación diferencial.

4.2. Las estrellas

Las estrellas evolucionan, pues se forman, fusionan o consumen los elementos que forman sus núcleos, y cuando estos elementos se agotan; devuelven material al medio interestelar y forman objetos compactos. Se entiende entonces como evolución estelar al ciclo de vida de las estrellas.

El tiempo de vida de una estrella depende de dos factores, la masa inicial y la composición química inicial.

La estructura interna de la estrella influye en su evolución, ya que esta depende de la masa de la estrella. Brevemente revisemos la estructura interna de distintos tipos de estrellas según su masa.

En las estrellas poco masivas ($M \lesssim 0{,}5\ M_\odot$), el transporte de energía en el interior es íntegramente convectivo desde el centro hasta la superficie. Esto se debe a que a sus bajas temperaturas la materia es opaca a los fotones y la radiación deja de ser una forma eficiente de transmitir la energía.

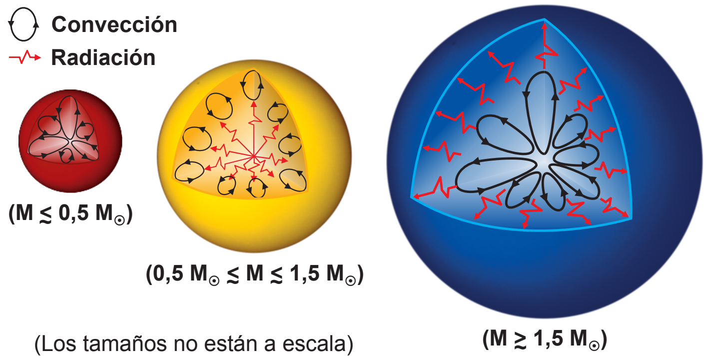


Figura 4.24: Estructura interna de estrellas de distintas masas.

En las estrellas de masas tipo solar ($0{,}5\ M_\odot \lesssim M \lesssim 1{,}5\ M_\odot$), la opacidad a la radiación es suficiente como para que surja un núcleo radiativo. Cuanto mayor sea la masa mayor será el núcleo radiativo en comparación con el tamaño de la estrella. Las estrellas de tipo solar, a diferencia de las menos masivas, no inyectan hidrógeno a su núcleo desde las capas exteriores, debido a que su zona convectiva ya no penetra hasta él, y por ende mantiene en las capas externas la misma composición química que tenía la nube que la formó. En las estrellas de $\sim 1{,}5\ M_\odot$ la capa convectiva prácticamente ha desaparecido y su interior es casi totalmente radiativo.

En 1938 *Hans Bethe* (1906 - 2005) y *Carl Von Weizsäker* (1912 - 2007), independientemente descubrieron que son posibles reacciones en las que interviene el carbono como catalizador[8]. Cuatro núcleos de hidrógeno forman un núcleo de helio, al final del ciclo, el carbono, al actuar como catalizador, se regenera. Este proceso es el denominado "*ciclo del carbono*" (CNO). El proceso de fusión utilizado por la estrella depende de su masa, una estrella como el Sol utiliza principalmente el proceso *protón-protón*, y las estrellas masivas utilizan principalmente el *ciclo del carbono*.

Entonces, en las estrellas más masivas que el Sol ($M \gtrsim 1{,}5\ M_\odot$), las cadenas protón-protón se vuelven menos eficientes, y el núcleo fusiona el hidrógeno en helio principalmente a través del *ciclo CNO*. Esto produce que la región central de la estrella se torne convectiva y también provoca que la región de producción de energía se encuentre muy localizada en el centro. Cuanto mayor sea la masa de la estrella, mayor será el núcleo convectivo, aunque estos núcleos son bastante pequeños en relación al tamaño de la estrella.

Por el contrario la radiación se ve favorecida a temperaturas elevadas donde la opacidad a la radiación se ve drásticamente reducida. Éste es el caso de las capas externas

[8]Se denomina catalizador a ciertos átomos que intervienen en una reacción acelerándola, pero al final de ella, estos elementos se regeneran.

subfotosféricas de las estrellas supermasivas que son completamente radiativas hasta casi su superficie, ya que son estrellas muy calientes.

La existencia de una cromósfera y una corona, es una consecuencia de una capa convectiva subfotosférica que tienen las estrellas más frías, como las de tipo solar.

4.2.1. El medio interestelar

El espacio entre las estrellas no se encuentra vacío, contiene materia en forma de gas y partículas sólidas conocidas como polvo interestelar. Sabemos de la existencia de esta materia a través de los efectos que produce sobre la luz de las estrellas, por ejemplo el gas produce atenuación de la luz, este efecto es denominado *extinción*, también produce la aparición de líneas de absorción y/o emisión estacionarias en los espectros de sistemas estelares binarios[9], en cuyos espectros las líneas se mueven producto del movimiento de las estrellas componentes. El polvo en cambio se evidencia debido a que produce *enrojecimiento* del color de las estrellas, también porque se observa carencia de ciertos elementos en los espectros de la materia interestelar; estos elementos serían los que condensarían para formar granos, cuyos tamaños son del orden de 0,1 [μm] (micrómetro), esto es, del orden de la longitud de onda de la luz visible. El enrojecimiento ocurre justamente debido a que los granos de polvo tienen tamaños del orden de la longitud de onda de la región azul del espectro electromagnético, bloqueando dicha luz. Este fenómeno es el mismo que ocurre cuando observamos el Sol a través del humo. El humo está compuesto por granos microscópicos, al ver el Sol a través de dicho humo, se observa enrojecido (figura 4.25).



Figura 4.25: El enrojecido Sol visto a través del humo de un incendio. Créditos: Isaías Rojas.

Otra evidencia de la existencia de granos es la polarización lineal (ver Apéndice B) de la luz, esto es, que la luz tiene una dirección preferencial de oscilación, que se debe a que los granos deben estar alineados en alguna dirección, esto nos da dos importantes informaciones: los granos de polvo no son esféricos sino ligeramente alargados y deben ser alineados por campos magnéticos que deben existir en el medio interestelar.

El gas y el polvo se encuentran íntimamente relacionados, y no son especies separadas en el medio interestelar. El elemento más abundante del medio interestelar es el hidrógeno, que se encuentra agrupado a densidades extremadamente bajas en vastas regiones que reciben el nombre de *nebulosas*. Las nebulosas contienen además de hidrógeno, pequeñas cantidades de otros elementos más pesados en forma de gas y polvo.

Aún en las nebulosas más densas, su densidad es tan baja, que es comparable con el "*vacío de laboratorio*", que es lo más cercano del vacío que se ha logrado reproducir artificialmente.

[9]Un sistema binario es aquel en que dos cuerpos celestes (estrellas, planetas, planeta y satélite, asteroides, etc.) se encuentran ligados gravitacionalmente, orbitando en torno del centro de masas común.

Los átomos que componen una nebulosa pueden ser ionizados por la radiación de estrellas muy masivas y calientes que existen en el interior de la misma nebulosa, formando las denominadas *regiones HII*. La radiación absorbida y re-emitida por la nebulosa es característica de la composición química de ésta. Las nebulosas que se encuentran en esta condición se denominan *nebulosas de emisión*. La nebulosa de Orión (M42[10]) es un caso típico de nebulosa de emisión (figura 4.26). Son las estrellas más brillantes cerca del centro, las que iluminan el gas restante y la reemisión de esta radiación, la hace brillar.



Figura 4.26: La nebulosa de orión se encuentra a unos 1.500 años-luz de distancia, en el mismo brazo espiral de la Vía Láctea. Está compuesta principalmente por hidrógeno, pero también se ha detectado la presencia de átomos de oxígeno, neón, nitrógeno, azufre, argón y cloro, y hay trazas de otros elementos. Créditos: NASA, ESA & M. Robberto (STScI/ESA) et al.

Si las estrellas asociadas con una nebulosa son de temperaturas más bajas, entonces la nebulosa brillará solamente reflejando la luz de ellas. Las nebulosas que se encuentran en esta condición se le denominan *nebulosas de reflexión*. Las pléyades (figura 4.27) son un ejemplo típico de este tipo de nebulosas.

Existe un tercer tipo de nebulosas, las *nebulosas oscuras*, que se evidencian porque ocultan las estrellas que se encuentras detrás, por lo que son muy eficientes absorbiendo la luz estelar. La absorción se debe a los granos de polvo y no al gas interestelar, que debido a las bajas temperaturas que poseen, se agrupan a altas densidades. La nebulosa *Cabeza de Caballo* (figura 4.28) y la nebulosa *Saco de Carbón*, se encuentran en esta condición.

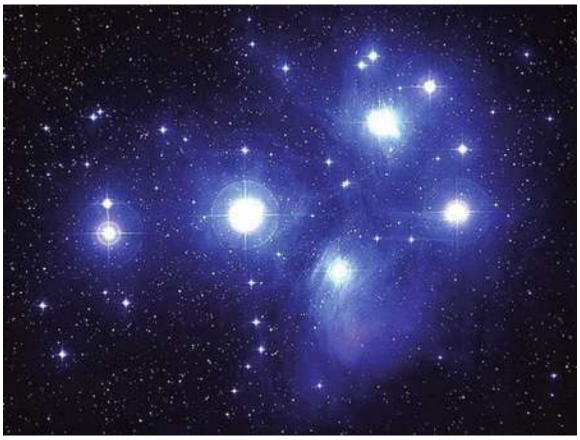




Figura 4.27: Izquierda: Las pléyades son un cúmulo abierto, compuesto por más de quinientas estrellas que están a unos 410 años-luz de distancia. A simple vista solo se pueden ver seis o siete estrellas. Créditos & Copyright: Australian Astronomical Observatory.

Figura 4.28: Derecha: NGC 2024, nebulosa oscura cabeza de caballo. Créditos: Anglo-Australian Observatory/Royal Observatory, Edinburgh.

[10]M, se refiere al catálogo de Messier.

Las nebulosas de emisión son calentadas por las estrellas de su interior, por lo que tienen temperaturas del orden de 10.000 [K], y sus masas son del orden de 10.000 masas solares. Las nubes difusas de hidrógeno neutro poseen temperaturas típicas de 50 [K] y sus masas son del orden de 1 a 100 masas solares. Las nubes densas tienen temperaturas típicas de 15 [K] y sus tamaños son del orden de 100 a 100.000 masas solares, y se componen de hidrógeno molecular (H_2), por lo que se denominan *nubes moleculares*. El hidrógeno molecular se forma en la superficie de los granos de polvo, que protege las moléculas de la radiación ultravioleta estelar, por lo que el hidrógeno molecular se encuentra en regiones donde el polvo es abundante.

4.2.2. Formación

Las estrellas se forman a partir del material existente en las frías nubes moleculares. Éstas no poseen una densidad uniforme. En las zonas de mayor densidad, el material de la nube comienza a aglutinarse debido a la fuerza gravitatoria, aumentando aún más su densidad, lo qué incrementa la atracción gravitatoria, comenzando un proceso de *contracción gravitatoria* de la nube.

En realidad, no está muy claro que es lo que desencadena la contracción gravitacional, posiblemente es producto de perturbaciones producidas por turbulencias en la nube o producto de otras estrellas que atraviesan la nube o de explosiones de estrellas formadas en su interior (supernovas).

Una vez iniciada la contracción de la nube, esta se fragmenta en regiones más pequeñas denominados *núcleos*. Cada núcleo sigue en contracción, con el aumento de la densidad la temperatura aumenta, por lo que es necesario que el núcleo se enfríe para poder continuar con la contracción, pues el calentamiento del mismo produce expansión, oponiéndose a la contracción. Se cree que el hidrógeno molecular juega un rol fundamental en este enfriamiento.

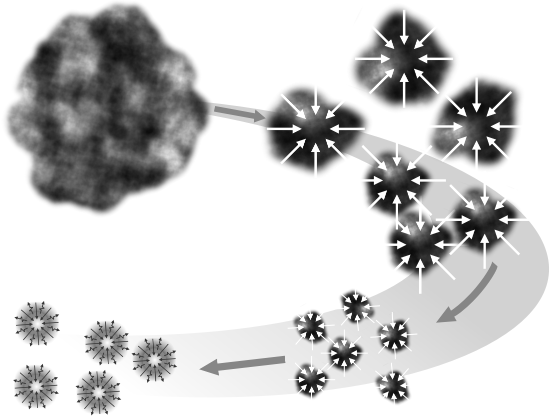


Figura 4.29: Representación pictórica de la fragmentación de una nebulosa en contracción y la consiguiente formación de núcleos.

A medida que el núcleo se contrae, comienza a rotar cada vez más rápido (a esto se le llama *principio de conservación del momentum angular*) y producto de la mayor densidad, la probabilidad de colisión de átomos aumenta, esto implica un aumento de temperatura[11]. Una vez que el núcleo se vuelve esférico, se denomina *protoestrella*.

Antes de continuar consideremos el siguiente ejemplo: cuando introducimos una varilla de hierro al fuego, ésta se calienta y si la sacamos de él, se puede evidenciar que la varilla irradia calor, si la mantenemos más tiempo expuesto a la fuente de calor, ésta comenzará a ponerse rojiza. Nos interesa este fenómeno en sí, por lo cual no consideraremos que la conducción del calor producirá que se caliente el extremo de donde lo tenemos sujeto. Si continuamos con la varilla de hierro sometida a la fuente de calor, podremos observar que cambia de color, siempre y cuando no se alcance la temperatura de fusión y comience a derretirse. Existe una relación entre color y temperatura. Supongamos que pudiésemos

[11] La temperatura está relacionada con la energía cinética media de las partículas.

seguir calentándola sin que se derrita. Cambiaría de rojo a amarillo (igual que el filamento de una bombilla o ampolleta) y si pudiésemos seguir calentándola se volvería azul.

Algo similar ocurre en una protoestrella, a medida que se contrae el núcleo y aumenta su temperatura, ésta comienza a irradiar calor en forma de radiación infrarroja, y la radiación infrarroja es capaz de atravesar la densa nube. En la actualidad los astrónomos toman fotografías en el infrarrojo para descubrir las protoestrellas (figura 4.30).

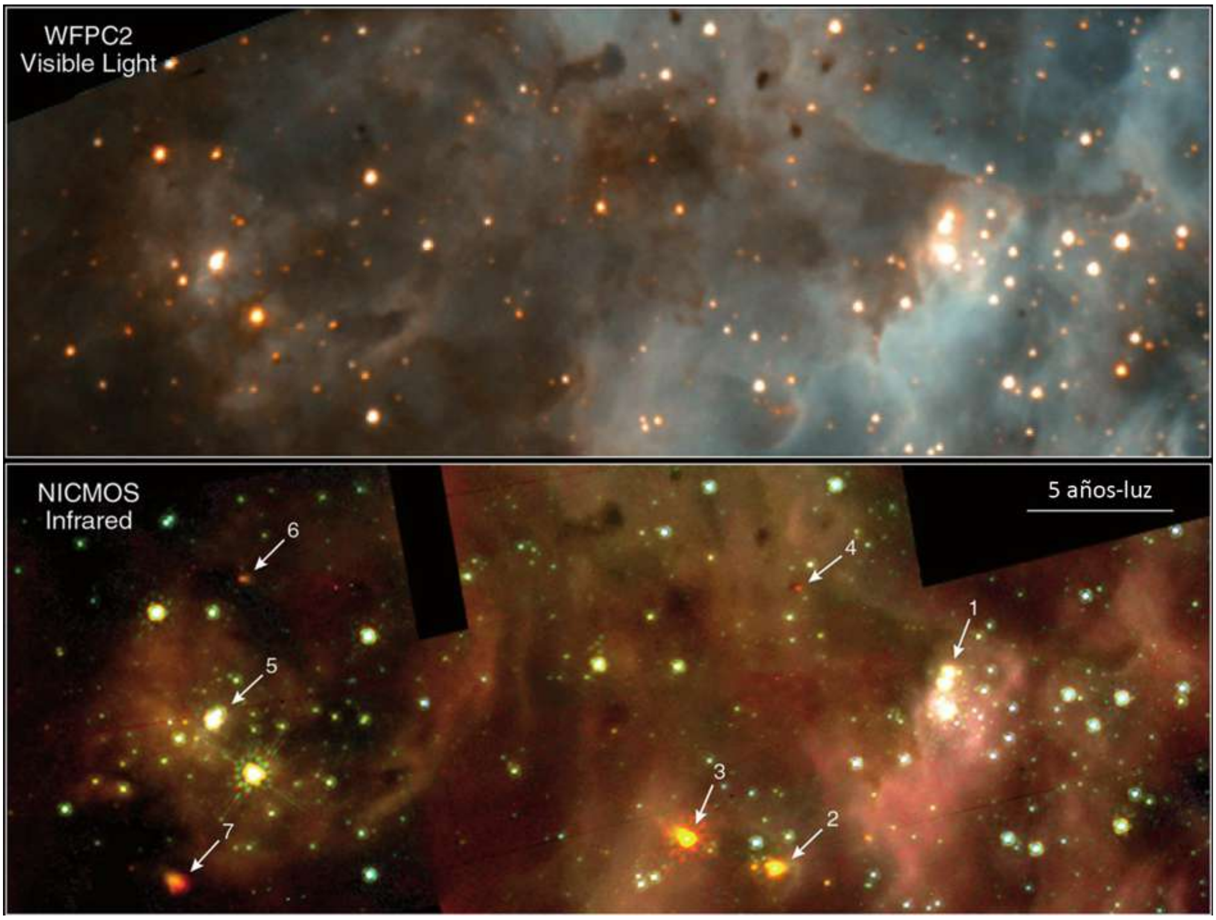


Figura 4.30: Protoestrellas observadas por el telescopio espacial *Hubble* en la nebulosa del Dorado. En la fotografía de arriba, hecha en el visible, no se aprecian las estrellas que aparecen enumeradas en la fotografía de abajo hecha en el infrarrojo. Esto se debe a que emiten muy poca luz visible ya que no han alcanzado la temperatura crítica para el inicio de la fusión, pero debido a los choques de los átomos, la nebulosa emite en el infrarrojo y además el material nebular es casi transparente para este tipo de radiación. Créditos imagen visible: NASA, John Trauger (JPL) & James Westphal (Caltech). Créditos imagen infrarroja: NASA, STScI, Nolan Walborn (STScI), Rodolfo Barbá (Observatorio Astronómico de La Plata) & Roger Thompson (University of Arizona).

A medida que la temperatura aumenta, las colisiones son más frecuentes, por lo cual los átomos pierden sus electrones y la materia alcanza progresivamente su cuarto estado, el plasma. Todas las estrellas están formadas por plasma.

Si la nube es lo suficientemente masiva, el aumento de la temperatura en el centro alcanza un valor crítico, que es cercano a los 10 millones de Kelvin. A estas temperaturas, los átomos ionizados se mueven a altas velocidades, los protones de los núcleos vencen la repulsión eléctrica y comienzan reacciones nucleares de fusión y como consecuencia de esto la generación de energía. En este momento se dice que ha nacido la estrella.

Dependiendo de su masa, se estima que el período de duración de esta etapa es:

- Unos cien millones de años para estrellas de un décimo de la masa del Sol (0,1 $M_{\odot}$).
- Unos treinta millones de años para estrellas como el Sol.
- Un millón de años para estrellas 10 veces más masivas que el Sol (10 $M_{\odot}$).

4.2.3. Estrellas fallidas

Una protoestrella puede salir de la nebulosa antes de que termine de acretar la suficiente masa para iniciar los procesos termonucleares. A estas "estrellas fallidas" se les denomina *enanas marrones*. Sus masas son menores que el valor crítico de masa para que comiencen las reacciones de fusión en el núcleo. Este valor va desde 0,07 $M_{\odot}$ a 0,09 $M_{\odot}$ dependiendo de la composición química. Se las ha encontrado principalmente dispersas en las nebulosas y orbitando a otras estrellas.

Aún no se tiene muy claro como se forman. Existen varios modelos que intentan explicar la existencia de este tipo de cuerpos celestes: los más aceptados se refieren a que son arrancadas, durante la formación, por otras estrellas y la fuerza de gravedad sería el agente que produce que se alejen de la nebulosa, de la misma forma que la gravedad de los planetas se utiliza para acelerar las naves o sondas que visitan otros planetas del sistema solar.

Una enana marrón típica, posee una masa de unas 50 veces la masa de Júpiter, un diámetro de 300.000 [km], y su estructura interna es completamente convectiva, es decir, transfieren calor desde sus núcleos a la superficie a través de flujos de plasma (transporte físico de materia) y aunque no son lo suficientemente masivas para sostener reacciones termonucleares en sus núcleos, algunos modelos indican que podrían tener procesos de *fusión de deuterio*[12].

Las enanas marrones son cuerpos celestes distintos a los planetas. Pues, como veremos en el próximo capítulo, los planetas se forman por un proceso diferente, a partir de un disco de acreción en torno de una estrella. Se diferencian también por los procesos convectivos ya que los planetas más masivos solo llegan a poseer procesos parciales de convección y además en que nunca producen fusión, ni siquiera de deuterio.

4.2.4. Secuencia principal

Los procesos de fusión termonuclear son los que permiten que una estrella brille, estos son posibles gracias a la gran temperatura de su núcleo, que en el Sol, según modelos, sería cercano a los 15 millones de Kelvin. El inicio de estos procesos en una protoestrella corresponde al nacimiento de la estrella, iniciando la denominada *secuencia principal*.

La secuencia principal es un periodo de relativa estabilidad donde la estrella mantiene un radio constante debido al *equilibrio hidrostático*, y su principal característica es la fusión de hidrógeno en helio con la consecuente generación de energía.

El equilibrio hidrostático es la igualdad entre la presión producida por la gravedad que tiende a contraer la estrella y la presión del gas que tiende a expandirla, a la presión del gas se agrega la *presión de la radiación*, producto de energía que fluye en forma de fotones al exterior. La suma de gravedad, presión del gas y presión de radiación será cero mientras la estrella se mantenga en equilibrio hidrostático.

[12]El deuterio es el isótopo del hidrógeno que posee en su núcleo un protón y un neutrón.

Mientras más masiva es una estrella, más grande y más caliente será, y más rápidamente fusiona su hidrógeno, y por lo tanto, mayor es su brillo. La rápida conversión de hidrógeno en helio también implica que el hidrógeno se agota antes para las estrellas más masivas que para las menos masivas.

Existe un límite superior a la masa de las estrellas. Cuando sus masas alcanzan este límite, su luminosidad alcanza el máximo posible para que se mantenga en equilibrio hidrostático, este límite es denominado *límite* o *luminosidad de Eddington*, sobre este valor la presión de radiación empuja materia produciéndose pérdida de masa.

Las estimaciones de la masa máxima que puede tener una estrella se encuentran entre 100 y 200 $M_\odot$. Existen evidencias observacionales que esto es así, por ejemplo *Eta Carinae* (η Carinæ), cuya masa se encuentra entre 100 y 150 $M_\odot$, es altamente inestable y propensa a violentas eyecciones de materia, causadas por luminosidad extrema ($L_\star \sim 4 \cdot 10^6 L_\odot$). Una de estas erupciones, observada en 1843, creó la nebulosa del homúnculo (figura 4.31).

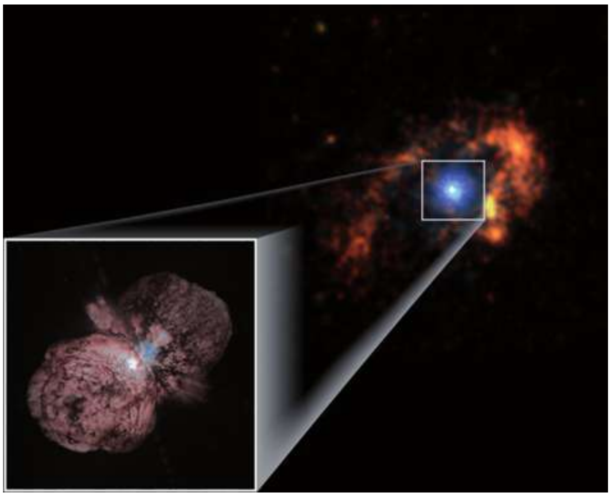


Figura 4.31: La elevadísima presión de radiación en Eta Carinae produce que ésta expulse grandes cantidades de materia de sus capas exteriores al espacio. En la imagen se puede apreciar la nebulosa homúnculo, formada por estas eyecciones de materia. Créditos: *HST*.

El color de una estrella, depende de su temperatura "efectiva" que se puede asociar a una temperatura "superficial" y ésta a la masa de la estrella. Así, estrellas menos masivas serán más frías y estrellas más masivas más calientes, por lo cual encontraremos estrellas en secuencia principal de diferentes colores, las enanas de color rojo y amarillo y las gigantes de color azul.

El tiempo que una estrella pasa en la secuencia principal, depende de la cantidad inicial de hidrógeno en el núcleo, lo que es proporcional a la masa total de la estrella. En estrellas poco masivas, la convección se extiende hasta la superficie, aportando hidrógeno al núcleo procedente de las capas externas, incrementando el tiempo en la secuencia principal. La tasa de consumo de hidrógeno es proporcional a la potencia total irradiada por la estrella, es decir, su luminosidad.

Una estrella pasa cerca del 90 % de su vida en la secuencia principal. Así, a modo de ejemplo:

- Una estrella con un décimo de la masa del Sol pasa cerca de 3 billones de años[13] en la secuencia principal, esto es, tres ordenes de magnitud[14] mayor que la estimación actual de la edad del Universo.
- Una estrella como el Sol pasa cerca de 10 mil millones de años en la secuencia principal.

[13]En español 1 billón corresponde a un millón de millones (10^{12}), y no se debe confundir con el billón de la escala numérica corta usada en los países de habla inglesa, Rusia, Grecia y Brasil que corresponde a mil millones (10^9).

[14]El orden de magnitud corresponde a la potencia de diez más representativa de una cantidad física. Así un orden de magnitud corresponde a diez veces, dos a cien veces, tres a mil veces y así sucesivamente.

- Una estrella 10 veces más masiva que el Sol pasa cerca de 30 millones de años en la secuencia principal.

- Una estrella 50 veces más masiva que el Sol pasa cerca de medio millón de años en la secuencia principal.

Debido a que las estrellas muy masivas pasan poco tiempo en la secuencia principal, no se alejan mucho de las nubes de las cuales se formaron antes de entrar en sus etapas finales de evolución.

Para una estrella de tipo solar, a medida que avanza la secuencia principal, va disminuyendo la cantidad de hidrógeno, lo que conlleva una disminución de la generación de energía. La consecuencia inmediata es que la fuerza gravitacional contrae el núcleo. Al contraerse el núcleo, aumenta su temperatura, y por ende la generación de energía, reestableciéndose el equilibrio. El aumento de la generación de energía, hace que la envoltura se expanda, aumentando el tamaño global de la estrella. El proceso continúa, y la cantidad de hidrógeno del núcleo sigue disminuyendo, repitiendo el ciclo hasta que éste se agota en el centro de la estrella.

Paralela y progresivamente comienza a crecer un núcleo interno predominantemente de helio inerte, es decir, que no tiene reacciones de fusión nuclear. Durante el proceso de contracción las capas de hidrógeno periféricas al núcleo de helio, incrementan la fusión de hidrógeno, esto produce un importante aumento de la generación de energía. Mientras, el núcleo de helio inerte incrementa su masa (sin contraerse) hasta alcanzar un límite de masa (denominado de *Shömberg-Chandraseckar*) de un 12 % de la masa de la estrella, momento en que la estrella sale de la secuencia principal.

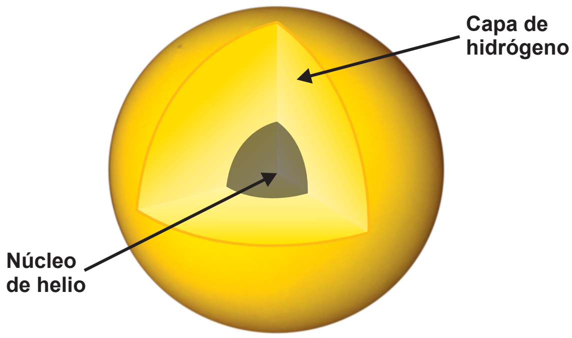


Figura 4.32: Hacia el final de la secuencia principal una estrella como el Sol posee un núcleo en que más del 90 % de su masa es de helio inerte, siendo el resto de su masa hidrógeno que aún realiza su proceso fusión.

Para una estrella más masiva que el Sol, las cosas son levemente distintas, ya que al poseer un núcleo convectivo, el centro de éste no se queda sin hidrógeno ya que dispone para la fusión todo el hidrógeno del núcleo convectivo. A medida que la cantidad de hidrógeno disminuye, el núcleo se contrae, aumentando la generación de energía, la envoltura se expande, esto ocurre hasta que el hidrógeno se agota en todo el núcleo, cesando todas las reacciones nucleares, a este proceso se le denomina el *apagado* (turn off), momento en que la estrella sale de la secuencia principal.

4.2.5. Etapas post-secuencia principal

Como hemos visto, estrellas poco masivas (entre 0,08 $M_\odot$ y 0,5 $M_\odot$), pasan tiempos extremadamente largos en la secuencia principal, a tal punto que sus vidas duran más que la edad actual del Universo. Las predicciones teóricas indican que la temperatura en su interior nunca se elevará lo suficiente como para que comience la fusión del helio. El hidrógeno continuará fusionándose hasta que se agote. El núcleo se contraerá convirtiéndose en un objeto compacto denominado *enana blanca*, que lentamente se enfriará, pasándose a denominar *enana negra*.

Para el caso de estrellas tipo solar, el núcleo de helio inerte crece hasta que alcanza el 12 % de la masa de la estrella. Una vez alcanzado este valor de masa, denominado *masa de Shömberg-Chandraseckar*, la contracción del núcleo no conlleva un aumento de temperatura, cuando esto ocurre se dice que el *núcleo se ha degenerado*. El núcleo de helio inerte se encuentra envuelto por una capa de hidrógeno en fusión, que produce la expansión de la región más externa, producto de lo cual la fotósfera de la estrella se enfría, disminuyendo su temperatura a unos 3.400 [K] y produciendo su enrojecimiento. Cuando esto sucede la estrella se ha convertido en una *subgigante roja*.

Por otra parte, la envoltura convectiva crece hacia el núcleo alcanzando la zona donde se realizaba la fusión, transportando elementos producidos por la fusión hacia la fotósfera, en el denominado *primer dragado*. Cuando la estrella deja de expandirse, la energía (que se usaba en expandir la estrella) se libera aumentando su luminosidad. Cuando esto sucede la estrella se ha convertido en una *gigante roja*. En esta fase, el Sol pasará unos mil millones de años y puede llegar a expandirse más allá de la órbita terrestre (figura 4.33).

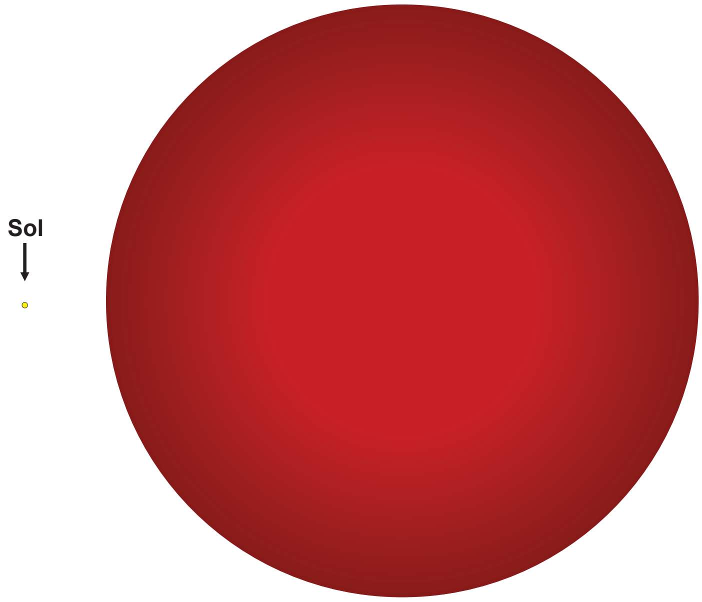


Figura 4.33: Comparación de tamaños del Sol en la etapa de secuencia principal (pequeño disco amarillo a la izquierda) con la de gigante roja (disco rojo a la derecha). En la figura el radio ha aumentado poco más de trescientas veces, alcanzado la órbita de Marte.

Así se produce un progresivo calentamiento del núcleo (aunque también existen procesos de refrigeración debido al escape de neutrinos). Cuando el núcleo posee cerca del 45 % de la masa de la estrella, la temperatura se ha incrementado a unos 100 millones de Kelvin. Alcanzando esta temperatura, comienzan las reacciones de fusión del helio al mismo tiempo en todo el núcleo, en el llamado *encendido, ignición o flash del helio*. Las reacciones se producen a través del proceso llamado "*triple alfa*[15]". Tres átomos de helio forman un átomo de carbono.

Con el aumento de la temperatura, los electrones aceleran, aumentando los estados disponibles, rompiéndose la degeneración, lo que produce un aumento de la presión que conlleva a una expansión violenta, por lo que la generación de energía disminuye, y por ende la luminosidad y por lo tanto el equilibrio hidrostático hace que la estrella nuevamente se contraiga. Finalmente se llega a un estado de estabilidad, se mantiene la fusión del helio en estado estacionario. Para el caso del Sol, esta etapa durará cerca de $2 \cdot 10^9$ [años].

Cuando comienza a agotarse el helio del núcleo, éste se va contrayendo lo que provocará que ocurra fusión de helio en una capa en torno del núcleo, esto expande aún más la envoltura de la estrella, produciendo su enfriamiento y con ello, que se detenga temporalmente la fusión de hidrógeno. En esta fase, denominada fase AGB (del inglés *asymptotic giant branch*: rama gigante asintótica), ocurre el segundo proceso de dragado de material nuclear a la superficie.

[15]Los núcleos de helio-4, se les denomina partículas alfa (ver Apéndice C).

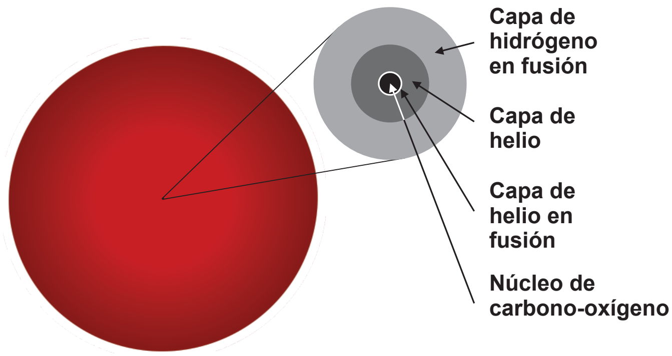


Figura 4.34: Una estrella al comenzar la fase AGB posee, producto de la fusión del helio, un núcleo compuesto de carbono-oxígeno rodeado de una delgada capa de helio en fusión, sobre la cual hay una capa de helio inerte y sobre ésta una capa de hidrógeno en fusión y una de hidrógeno-helio inerte.

Para el caso de estrellas más masivas que el Sol, al terminar la secuencia principal se había producido el apagado, esto lleva a la contracción del núcleo de helio inerte, lo que produce que aumente su temperatura. El aumento de la temperatura produce que se reinicien las reacciones nucleares en una capa que rodea al núcleo, lo que produce que la envoltura de la estrella comience a expandirse.

Estas estrellas poseen un gran núcleo convectivo, lo que impide su degeneración. La energía generada por la capa de hidrógeno en fusión permite que por un breve periodo de tiempo (del orden de 75.000 años) la estrella mantenga su luminosidad aproximadamente constante. Luego de esto, de forma similar a las estrellas de tipo solar, la estrella detiene la expansión aumentando su luminosidad. El núcleo progresivamente se convierte en un núcleo de carbono, una vez terminado este proceso, el núcleo tiende a contraerse, esto conlleva a aumentos en la temperatura y la presión del núcleo. Si la estrella tiene la masa suficiente, las capas de helio periféricas al núcleo de carbono alcanzan la temperatura suficiente para comenzar reacciones de fusión, esto produce un importante aumento de la generación de energía. La estrella se ha convertido en una *supergigante roja* (figuras 4.35 y 4.36).

Solo estrellas de masas superiores a 8 $M_\odot$ producirán un aumento de temperatura suficiente ($T \simeq 10^8$ [K]) para producir el encendido del carbono.

Mientras más masiva es una estrella, más pesados son los elementos que puede fusionar. Para temperaturas del orden de 10^9 [K], se producen reiteradas fusiones con núcleos de helio (o partículas alfa), obteniéndose hasta el cerio (Ce^{40}), y con temperaturas del orden de $4 \cdot 10^9$ [K], en presencia de partículas alfa se obtiene hasta el hierro (Fe^{56}). Tenemos entonces que a través de fusión con partículas alfa se forman elementos desde el C^{12} al Fe^{56}, esta es la llamada *escala alfa*, debido a que los átomos incrementan su masa en 4 unidades de masa atómica.

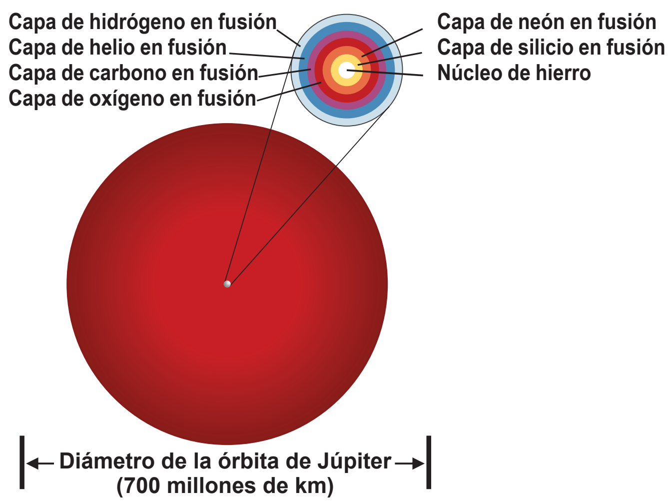


Figura 4.35: A medida que la evolución de la supergigante prosigue, el núcleo va convirtiendo cada vez elementos más pesados, y la estructura de la estrella se compone de capas (igual que una cebolla) que contienen elementos más livianos hacia la periferia.

Para tener una idea de las escalas de tiempo, una estrella de 25 $M_\odot$ fusiona carbono unos 600 años, y para fusionar desde el carbono hasta el hierro demora menos de 2 años.

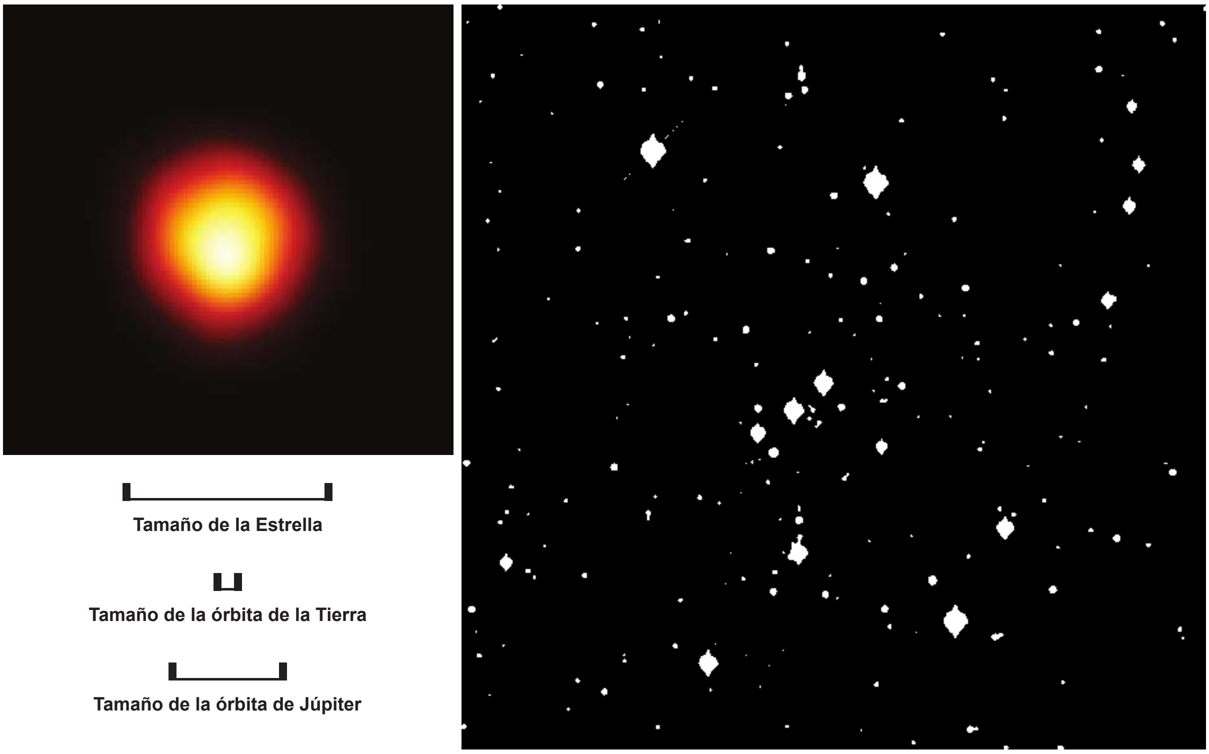


Figura 4.36: Betelgeuse, la supergigante roja de la constelación de Orión (marcada en la imagen de la derecha) se encuentra a 429 años-luz, su radio es 1.516 radios solares, su temperatura superficial es de 3.488 [K]. Si ubicásemos a Betelgeuse en lugar del Sol, los 6 primeros planetas quedarían en el interior de la estrella, observe la escala de tamaños de las órbitas (abajo a la izquierda). Créditos: A. Dupree (CfA), R. Gilliland (STScI), NASA.

Durante los últimos días se contrae sucesivamente permitiendo fusionar en el núcleo cada vez elementos más pesados, hasta que transforman silicio en azufre y luego este a hierro.

La estrella posee ahora un gran núcleo masivo (del orden de 0,1 $M_{\odot}$), formado de hierro (Fe^{56}). Aquí entra en juego otro fenómeno; la fuerza nuclear, que es la que mantiene unidos los núcleos de los átomos (ver Apéndice C). La fuerza nuclear es la fuerza más fuerte del Universo, pero solo actúa a pequeñas distancias (del orden de la millonésima parte de una millonésima de metro), ya que se debilita abruptamente con la distancia. Así la cohesión de los núcleos atómicos se ve fuertemente afectada con el aumento de su tamaño, pues la fuerza nuclear es menos intensa, por otra parte, al tener más protones los núcleos, aumenta la repulsión eléctrica. De esta forma, generar elementos más pesados requiere más energía de la que la estrella está produciendo, por lo cual, el Fe^{56} es el último elemento formado a través de reacciones nucleares regulares en el interior de una estrella.

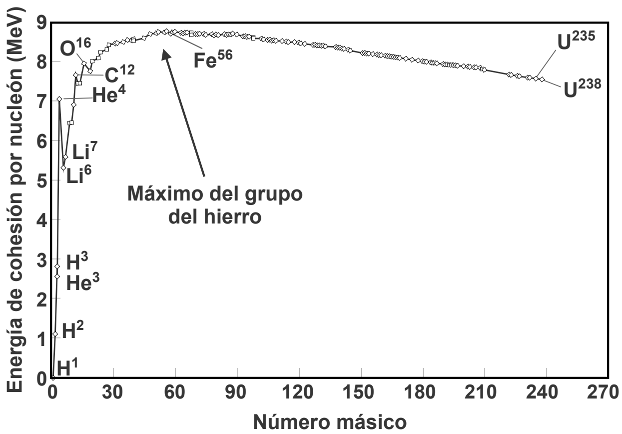


Figura 4.37: Gráfico de energía de cohesión en función del número de atómico. Se observa que la máxima energía de ligadura del núcleo atómico está en el grupo del hierro. Fuente: Wikipedia.

4.2.6. Últimas fases de la evolución estelar

Dependiendo de la masa de la estrella, ésta podrá o no fusionar elementos más pesados que el hidrógeno, aquellas muy poco masivas no alcanzarán en sus núcleos la temperatura suficiente para fusionar el helio. Estrellas más masivas, sí alcanzarán la temperatura suficientes para fusionar el helio, convirtiéndolo en carbono y oxígeno, y mientras más masiva es la estrella, podrá seguir fusionando elementos cada vez más pesados hasta alcanzar el grupo del hierro.

Cuando una estrella ya no puede seguir fusionando elementos, la gravedad supera la presión interna de la estrella y el núcleo se comienza a comprimir, pero la compresión, no sigue indefinidamente, tiene un límite que está determinado por la naturaleza de las partículas subatómicas, las que se rigen por las leyes de la mecánica cuántica.

Cómo una estrella finaliza su ciclo de vida, depende, al igual que toda su evolución, de su masa.

Masa Inicial	**Estado Final**
$0{,}08\ M_\odot < M < 0{,}5\ M_\odot$	enana blanca de helio
$0{,}5\ M_\odot < M < ?\ M_\odot$	enana blanca de carbono-oxígeno
$?\ M_\odot < M < 10 \pm 2\ M_\odot$	enana blanca de O-Ne-Mg
$10 \pm 2\ M_\odot < M < 30 \pm 10\ M_\odot$	supernova-estrella de neutrones
$M > 30 \pm 10\ M_\odot$	supernova-agujero negro

4.2.6.1. Enanas blancas - nebulosas planetarias

En el interior de las estrellas la materia se encuentra en su cuarto estado, el *plasma*. Los electrones no están ligados a los núcleos atómicos y su estado, llamado *estado cuántico*, está dado por su energía, su cantidad de movimiento o *momentum* y su cantidad de movimiento angular intrínseco o espín (del inglés *to spin*, girar). Como el número de estados posibles que pueden ocupar los electrones es limitado, debido al principio de exclusión de Pauli[16] (Apéndice C), a alta densidad, los electrones ocupan todos los estados de baja energía, ocupando cada vez estados de mayor energía, lo que les obliga a moverse a altas velocidades, oponiéndose a la compresión, se dice que están en su *estado degenerado* y la presión que ejercen se denomina *presión de degeneración*.

Se dice que una estrella tiene un *núcleo degenerado* cuando la temperatura deja de ser función de la presión, es decir, cuando la compresión del núcleo no conlleva a un aumento de la temperatura.

Continuemos con la evolución de una estrella tipo solar. En la fase post-AGB, la estrella fusiona helio y reinicia la fusión de hidrógeno en una capa. Las inestabilidades en las capas de helio e hidrógeno empujan las delgadas capas de la envoltura, alcanzando velocidades mayores que la velocidad de escape[17], expandiéndose hacia el medio interestelar en varias oleadas. Las capas se expanden a velocidades promedio de unas decenas de kilómetros por segundo. Este proceso devuelve al medio interestelar no solo hidrógeno, sino también material procesado que conformará el polvo.

[16]El principio de Pauli indica que sólo un número limitado de electrones puede existir en un cierto volumen a un determinado nivel de energía.

[17]La velocidad de escape es aquella que necesita cualquier cuerpo o partícula, para escapar de la atracción gravitatoria de un cuerpo celeste.

El núcleo ya ha agotado el helio y se contrae y calienta progresivamente. Las estrellas de tipo solar no alcanzan las temperaturas necesarias para iniciar la fusión del carbono. El núcleo se contrae hasta que la presión de degeneración electrónica detiene la contracción. A este tipo de objetos compactos, remanentes del núcleo estelar que se mantienen en equilibrio a través de la presión de degeneración de los electrones, se denominan *enanas blancas*[18].

Una enana blanca es un objeto extremadamente denso, de unos 10.000 [km] de diámetro y de densidad cercana a una tonelada por centímetro cúbico ($\sim 10^6$ [g/cm^3]).

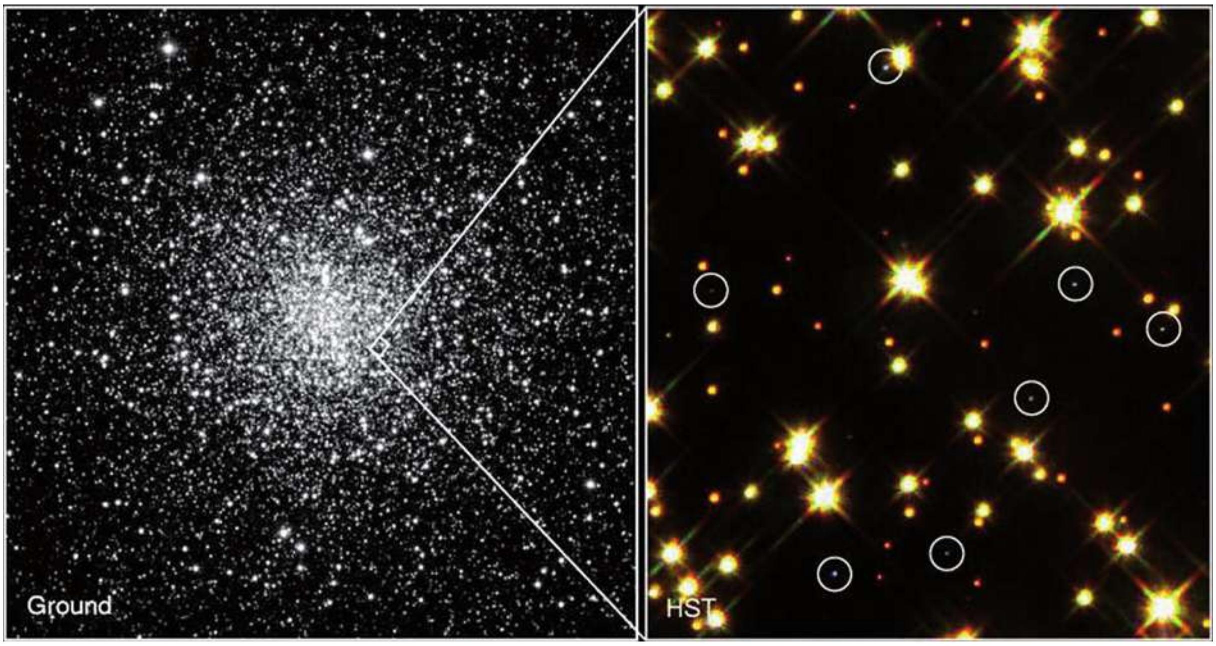


Figura 4.38: Cúmulo globular M4 (Izquierda), el campo de 47 años luz posee abundantes gigantes rojas. A la derecha, ocho enanas blancas (marcadas con círculos), en un campo de 0,63 años-luz, se observan también estrellas tipo solar y enanas rojas. Créditos imagen izquierda: Kitt Peak National Observatory, NOAO/AURA/NSF, fotografía de M. Bolte (University of California, Santa Cruz). Créditos imagen derecha: Harvey Richer (University of British Columbia, Vancouver, Canadá) y NASA.

Cuando la enana blanca alcanza una temperatura superficial de unos $\sim$ 30.000 [K], su radiación hace brillar las capas en expansión, produciendo el fenómeno denominado *nebulosa planetaria*[19] (figura 4.39).

Cuando el Sol se convierta en una enana blanca será un poco más pequeña que la Tierra, pero aún poseerá una masa muy parecida a la actual, ya que la cantidad de masa que perderá en la etapa de nebulosa planetaria será pequeña comparada con la masa total del Sol.

Las enanas blancas se pueden observar en el visible, pues poseen un amplio rango de temperaturas superficiales (y por ende colores), desde menos que $5 \cdot 10^3$ [K] hasta más de $8 \cdot 10^4$ [K] y pueden ser vistas, en muchos casos, asociadas a nebulosas planetarias.

[18]El nombre enana blanca no tiene nada que ver realmente con su color, pues las hay de casi todos los colores.

[19]El nombre de nebulosa planetaria no tiene relación con que estos objetos formen planetas, este nombre fue dado con anterioridad a que se entendiera la verdadera naturaleza de las nebulosas y los procesos de formación planetaria que estudiaremos en el próximo capítulo.



Figura 4.39: Nebulosa planetaria Hélice, observada en infrarrojo (izquierda) y en el visible (derecha), la forma de anillo se debe a que al ser vistas desde la Tierra se observan capas de diferente grosor. Créditos: ESO/VISTA/Jim Emerson.

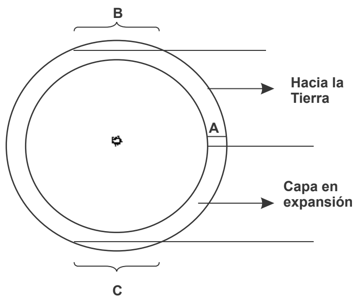


Figura 4.40: La forma de anillo que caracteriza a una nebulosa planetaria típica se debe a que en la región del aparente anillo la capa de gas es más gruesa (regiones B y C), vista desde la Tierra, que en la zona central (región A).

Las enanas blancas, desde el punto de vista teórico, fueron propuestas a mediados de la segunda década del siglo XX por *Ralph Fowler* (1889 - 1944) usando consideraciones de naturaleza mecánico-cuánticas de los electrones. En 1930 el astrofísico *Subrahmanyan Chandrasekhar* (1910 - 1995) se dio cuenta que debido al principio de Pauli, la compresión estelar obliga a aumentar la rapidez con que se mueven los electrones, pudiendo incluso alcanzar la rapidez de la luz, lo que de acuerdo a la teoría de la relatividad especial, no está permitido.

Trabajando en esto, e incorporando la relatividad especial en sus cálculos, Chandrasekhar descubrió que existe un límite de masa del núcleo estelar, que al ser superado, la presión de degeneración de los electrones no es capaz de contrarrestar la contracción gravitacional de la estrella, pues para ello requeriría que los electrones violaran el límite máximo de velocidad propuesto por la relatividad especial. Dicho límite de masa tiene un valor cercano a 1,44 $M_\odot$ y es denominado *límite de Chandrasekhar*.

4.2.6.2. Supernovas hidrodinámicas

Hemos visto que estrellas con masas menores a $8M_\odot$ no fusionan elementos muy pesados, desarrollando un núcleo degenerado que se convierte en una enana blanca.

Estrellas con masas entre 8 y 12 masas solares tienen pérdidas de masa que no son despreciables, por lo que si pierden la suficiente cantidad de masa podrían terminar como enanas blancas, en caso contrario, seguirán su evolución como las estrellas de masas mayores a $12M_\odot$.

Estrellas con masas mayores a $12M_\odot$, luego de unas pocas decenas de millones de años, alcanzan sus etapas finales de evolución, y en unos pocos días se contraen sucesivamente permitiendo fusionar en el núcleo elementos cada vez más pesados. Cuando el núcleo

alcanza los $2{,}7 \cdot 10^9$ [K] y $3 \cdot 10^7$ [g/cm^3] se inicia la fusión del silicio en un conjunto de complejas reacciones que sostendrán por un poco más de un día a la estrella.

Formación del núcleo de Fe-Ni

Una parte del silicio, a través de reacciones de fusión, forma níquel-56 que posteriormente decae hasta el hierro-56. Otra parte del silicio, debido al impacto de fotones ultraenergéticos, se fisiona en silicio-27 o magnesio-24. En el proceso se producen una gran cantidad de protones, neutrones y partículas alfa. Estos constituyentes ligeros se fusionan con el silicio restante y con elementos más pesados, hasta que los elementos del grupo del hierro llegan a ser los más abundantes.

El núcleo de hierro crece de forma acelerada acercándose a un valor máximo de masa en que es estable (figura 4.41).

La fusión del hierro es altamente endotérmica, esto es, absorbe mucha energía por lo que dicho proceso no ocurre, alcanzándose finalmente el denominado *equilibrio estadístico nuclear*, es decir, se producen las reacciones directas e inversas estadísticamente equilibradas, y el núcleo de la estrella queda compuesto de hierro y níquel.

Al detenerse la generación de energía se rompe el equilibrio hidrostático: *¡La contracción es inevitable!*

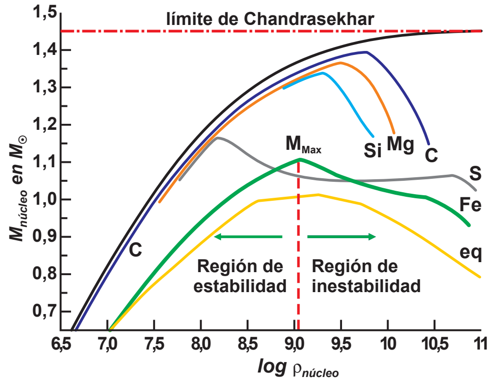


Figura 4.41: Relación entre masa y densidad central (en g/cm^3) para estrellas de temperatura absoluta cero compuestas de ^{12}C, ^{24}Mg, ^{28}Si, ^{32}S y ^{56}Fe y para condiciones de equilibrio (eq). La curva negra (a la izquierda) representa el modelo de Chandraseckar, la línea punteada vertical divide la zona de estabilidad de la de inestabilidad en estrellas de hierro. Adaptación de figura original de Hamada, T. & Salpeter, E. E. ApJ. 134:683–698 (1961). Reproducido con el permiso de AAS.

Fase de contracción-colapso

La contracción del núcleo hace, gracias al principio de exclusión de Pauli, que los electrones se muevan a velocidades relativistas, pudiendo estos penetrar los núcleos atómicos y combinarse con los protones formando neutrones, a través del *decaimiento beta inverso*:

$$e^- + p \longrightarrow n + \nu_e$$

En condiciones normales, los neutrones decaen rápidamente en protones, electrones y antineutrinos (*decaimiento beta*[20]), pero las condiciones alcanzadas por el núcleo en colapso permite que ocurra el fenómeno inverso.

La rápida disminución de electrones hace que la decreciente presión de degeneración electrónica no pueda contrarrestar la gravedad, siguiendo la rápida contracción.

Por otra parte los fotones colisionan violentamente con los núcleos pesados como el hierro fisionándolos (fotodesintegración) en núcleos de helio, protones y neutrones libres:

$$^{56}Fe + \gamma \longrightarrow 13\ ^4He + 4n$$
$$^{4}He + \gamma \longrightarrow 2p^+ + 2n$$

[20]Las partículas beta (β) son electrones, de allí el nombre de este proceso de decaimiento.

Éstos dos procesos y el proceso beta inverso llevan a la generación de neutrones y una pérdida de energía en el núcleo ($\sim 1,7 \cdot 10^{44}$ [J])[21], acelerando la contracción, dando paso al *colapso*. Se puede demostrar que la velocidad de colapso es de una fracción de la velocidad de la luz. En tanto que el núcleo colapsa, las capas externas no tienen tiempo de reaccionar, desacoplándose, y no participando de este proceso.

La rápida generación de neutrones produce una enorme presión de degeneración neutrónica, que no sólo sería capaz de frenar el colapso sino también de expandir el núcleo. Las capas exteriores en colapso rebotarían al chocar con el núcleo, aunque puede que no sea la única causa, ya que basta que solo un 1 % de la energía de los neutrinos sea transferida a estas capas para producir su expulsión.

Explosión

Ya sea por rebote o por empuje producido por los neutrinos, las capas en torno del núcleo viajan hacia afuera, mientras las capas externas están en caída libre (figura 4.42). El rebote sería un efecto local que se propaga hacia el exterior, mientras que los neutrinos pueden empujar las distintas capas en la medida que escapan.

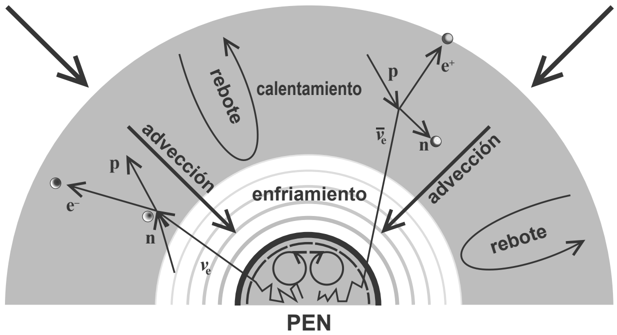
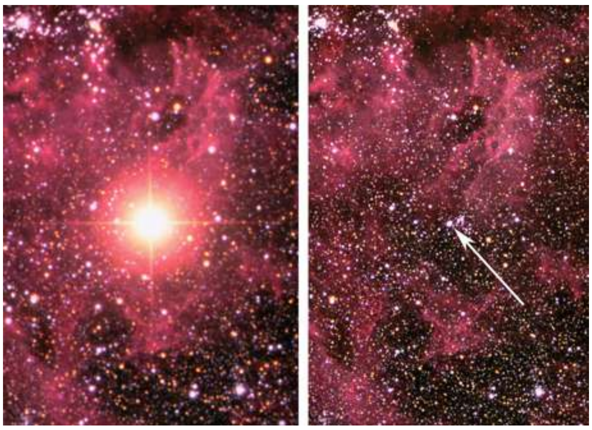


Figura 4.42: Las capas exteriores caen mientras que las capas más cercanas al núcleo han rebotado. Al interior permanece el núcleo compacto convertido en una “protoestrella de neutrones” (PEN). Adaptación de figura original de Janka, H.-Th. A&A, 368, 527-560 (2001). Reproducido con el permiso de © ESO.

La presión de los neutrinos y/o del rebote de las capas, sobre las capas externas al núcleo producen una onda de choque supersónica que viaja, en fracciones de segundo, desde el núcleo a la periferia.

El aumento de temperatura en las capas exteriores (inicialmente en colapso) producido por la onda de choque que viaja a través de ellas, provee la energía suficiente para que en solo fracciones de segundo se produzcan reacciones termonucleares que forman elementos más pesados que el hierro. A este proceso se le denomina *nucleosíntesis explosiva*, siendo ésta altamente energética y hace que se expulsen al medio interestelar una gran cantidad de partículas y fotones, a tal punto, que la estrella puede llegar a brillar más que toda la galaxia huésped, las que poseen en promedio unas 10^{11} estrellas. A este fenómeno se le denomina *explosión de supernova* o simplemente *supernova*. La supernova 1987A (figura 4.43) ha permitido probar este modelo: el Kamiokande (un observatorio de


Figura 4.43: La supernova 1987A (SN 1987A) (izquierda) diez días después de la explosión y su progenitora (indicada por la flecha a la derecha) fotografiada el 05/02/1984. Créditos & Copyright: Australian Astronomical Observatory, fotografías de David Malin.

[21] [J] (joule o también julio) corresponde a la unidad de Sistema Internacional de Unidades, utilizada para medir energía, trabajo y calor.

neutrinos localizado en Japón) detectó un aumento del número de neutrinos pocas horas antes que se observara la explosión de la supernova.

Existen otras formas de producir la explosión de una estrella que no es el choque hidrodinámico de gas, por lo que para distinguir a estas supernovas de aquellas producidas por otros mecanismos, las denominaremos *supernovas hidrodinámicas*.

Dado que las estrellas que forman supernovas hidrodinámicas evolucionan en tiempos relativamente cortos, no se alejan mucho de sus lugares de formación, y por ende los remanentes se pueden encontrar principalmente en los brazos espirales de nuestra galaxia.

Cuando nacieron las primeras estrellas, las nebulosas de donde se formaron, casi no poseían elementos pesados, y por tanto no podían formar planetas. Estas estrellas, denominadas de *población III*, eran más masivas y por ende, tenían períodos de vida más cortos que las estrellas actuales[22]. Al explotar como supernovas contaminaron el medio interestelar produciendo progresivamente un cambio en la composición química de las nebulosas, por lo cual en la actualidad podemos observar estrellas, denominadas de *población II* y de *población I* que poseen mayor cantidad de elementos más pesados que el hidrógeno y el helio.

El material expulsado por una supernova, convertido en una nube de gas y polvo, es denominado *remanente de supernova* (SNR, de sus siglas en inglés) (figuras 4.44 y 4.45).



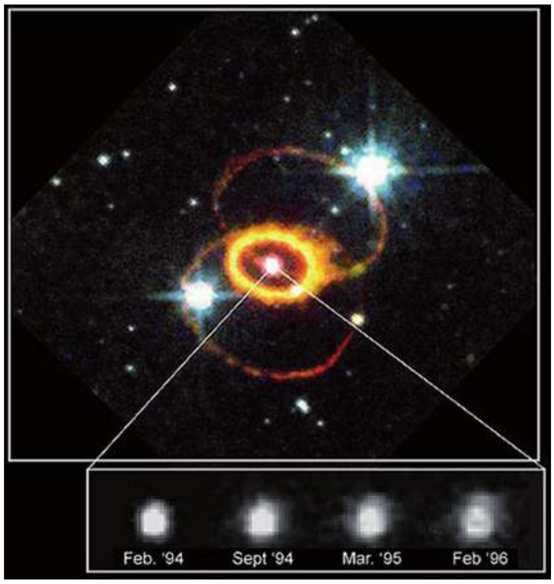


Figura 4.44: Izquierda: La nebulosa del Cangrejo es el remanente de la explosión de supernova observada en el año 1054. Este remanente de Supernova tiene 10 años-luz de diámetro y se encuentra a 7.000 años-luz en la constelación de Taurus. Créditos: ESO.

Figura 4.45: Derecha: Remanente de la explosión de supernova SN 1987A. Créditos: *HST*.

Supernovas en la bóveda celeste

Las *supernovas* (del latín: *nova*, nueva) deben su nombre a que en contadas ocasiones se ha observado un repentino aumento de brillo de estrellas de la esfera celeste, incluso muchas de estas veces han aparecido donde antes no se observaba nada, por lo que se les llamó inicialmente "*stella nova*" o simplemente *nova*. Posteriormente se les agregó el prefijo "super" para distinguirlas de otro fenómeno de características similares pero menos luminoso, que mantuvieron el nombre de novas.

[22]Es importante recordar que el tiempo de vida de las estrellas depende no solo de su masa, sino también de la composición química inicial.

Las supernovas pueden ser visibles desde varias semanas a varios meses. Se caracterizan por un rápido aumento de intensidad hasta alcanzar un máximo, para luego decrecer en brillo de forma más o menos suave hasta desaparecer completamente.

Las supernovas observadas y registradas han sido las siguientes:

- *532 a. de C.*: Astrónomos chinos registran la aparición de una "estrella huésped" (nombre utilizado para referirse a las novas y supernovas), en la constelación del Águila.

- *185:* Astrónomos chinos (y también posiblemente en Roma) registran la aparición de una "estrella huésped" en el asterismo de Nanmen (una parte del cielo identificada con alfa y beta centauri). Análisis de datos obtenidos en rayos X por el observatorio XMM-Newton y Chandra sugieren que la nebulosa RCW 86 sería su remanente.

- *393:* Astrónomos chinos registran la aparición de una "estrella huésped" en la "cola del Dragón", actual constelación del Escorpión.

- *1006:* Aparición de la "stella nova" más brillante registrada. Fue observada por astrónomos árabes, chinos y japoneses cerca del horizonte, en la que es actualmente la constelación de Lupus. En dicha ubicación se encuentra hoy día la radiofuente PKS1459-41 y el remanente de supernova SNR G327.6+14.6.

- *1054:* Astrónomos chinos y japoneses registran la aparición de una "estrella huésped" en lo que hoy conocemos como la constelación de Tauro. En dicha ubicación se encuentra hoy día la nebulosa del Cangrejo (figura 4.44) y el PSR 0531+121.

- *1181:* Astrónomos chinos y japoneses registran la aparición de una "estrella huésped" en lo que hoy conocemos como la constelación de Cassiopeia. En dicha ubicación se encuentra hoy día 3C58 (SNR G130.7+03.1 & PSR J0205+6449), aunque hay dudas en esta correspondencia.

- *1572:* "stella nova" registrada por varios astrónomos, entre ellos Tycho Brahe. Aunque él no fue el primero en descubrir la aparición de la "nova", publicó en el libro "*De nova et nullius ævi memoria prius visa stella*" (1573, 1602 y 1610), las observaciones más detalladas de la aparición y de la evolución del brillo de la "nova". Razón por la cual se le conoce con su nombre.

- *1604:* "stella nova" en Ophiuchus, fue observada por numerosos astrónomos europeos, chinos y coreanos, entre ellos Johannes Kepler. Esta supernova es la última vista en la Vía Láctea (se han descubierto otras posteriores que no fueron observadas).

- *1885:* "stella nova" en la "nebulosa de Andrómeda". Fue descubierta por varios observadores. Hoy sabemos que fue la primera supernova observada más allá de la Vía Láctea.

- *1987:* supernova en la Gran Nube de Magallanes (SN 1987A, figura 4.43). Fue descubierta por Ian Shelton y Oscar Duhalde (Chile) e independientemente por Albert Jones (Nueva Zelanda). Es la primera supernova cercana que permitió probar las teorías modernas sobre la formación de las supernovas.

Año	Constelación	Mag.	T [M]	d [A-L]	Remanentes
185	Centaurus	-8 (?)	20	8200	RCW 86 o SNR 315.0-02.3
393	Scorpius	-1 (?)	8	15000	No identificado
1006	Lupus	-7.5	?	7200	PKS1459-41 & SNR G327.6+14.6
1054	Taurus	-5	22	6300	PSR0531+121 & M1 o NGC 1952
1181	Cassiopeia	-1 (?)	6	> 26000	3C58
1572	Cassiopeia	-4	16	7500	B Cas o 3C10 o G.120·1+1·4 & estrella tipo solar
1604	Ophiuchus	-2.5	12	13000	V 843 Ophiuchi, G004.5+06.8

Tabla 4.1: Cuadro resumen de las supernovas ocurridas en la Vía Láctea y observadas y/o registradas. T representa el tiempo de visibilidad en meses y d la distancia en años-luz.

4.2.6.3. Estrellas de neutrones y púlsares

Si durante el colapso de una supernova la presión de degeneración de los neutrones frena el colapso, el núcleo de la estrella se ha convertido en un objeto compacto, de radio aproximado de 10 a 15 [km] con una densidad media de 10^{15} [g/cm^3] conocido como *estrella de neutrones*.

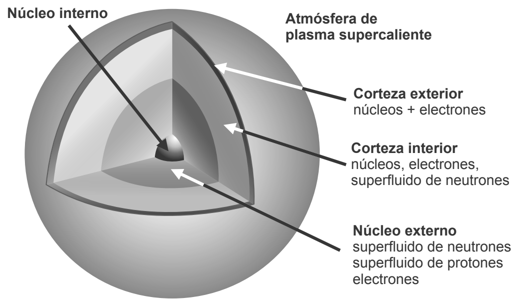


Figura 4.46: Estructura global de una estrella de neutrones. Casi el 32 % de la estructura de la estrella corresponde al núcleo.

Los modelos indican que la estructura interna de una estrella de neutrones estaría formada por un gran núcleo que ocuparía el 32 % del volumen de la estrella y sobre éste una corteza. La *corteza exterior* está formada de elementos pesados y electrones relativistas, es decir, que se mueven a grandes velocidades. La envolvente puede ser sólida, o también es posible que tenga una atmósfera, debajo de la cual habría una capa líquida y bajo ésta se encontraría la capa sólida. Hacia el interior la densidad aumenta, apareciendo núcleos atómicos cada vez más exóticos que contienen cada vez más neutrones. La *corteza interior* está compuesta por un cristal y un líquido *superfluido* (sin viscosidad ni fricción) de neutrones pareados, que llenan el espacio entre los núcleos atómicos.

Hacia la interfaz corteza-núcleo de la estrella, las densidades han alcanzado valores del orden de 10^{14} [g/cm^3], y los núcleos atómicos se deforman formando aglomerados nucleares compuestos por un 95 % de neutrones y un 5 % de protones, lo que justifica el nombre de estrella de neutrones. A medida que vamos más al interior de la estrella, ésta alcanzará la densidad típica de los núcleos atómicos, donde se pierde la distinción entre los neutrones que están dentro o fuera de los núcleos, como resultado se tiene un fluido de protones, neutrones y electrones y la presión dominante está dada por la presión de degeneración de los neutrones. El fluido formado por pares de protones, es posiblemente superconductor (sin resistencia eléctrica). Más hacia el interior de la estrella, en el denominado *núcleo interior*, la estructura y composición no se conocen con suficiente detalle.

Una estrella de neutrones aislada, sin materia en torno a ella, es prácticamente invisible. Su altísima temperatura hace que la mayor cantidad de energía radiada esté en el rango de los rayos X, aunque emite un poco en el visible, ultravioleta y gamma, esta radiación es prácticamente indetectable. Sin embargo, dado que comúnmente el eje de rotación de las

estrellas no coincide con el eje de los polos magnéticos, si el eje de rotación de la estrella de neutrones está en cierta posición, al girar, un haz de radiación puede barrer en dirección de nuestro planeta, produciendo pulsos que pueden ser detectados. Las frecuencias de los pulsos coinciden con la frecuencia de rotación de la estrella. Estas estrellas de neutrones en rápida rotación que poseen campos magnéticos extremadamente intensos y cuyos haces barren en dirección de la Tierra se denominan *púlsares*.

En 1967 *Jocelyn Bell* (1943 -), una estudiante de posgrado de Cambridge descubrió casualmente una radiofuente regular que emite pulsos periódicos cada 1,337302088331 segundos, que sería finalmente identificada como el primer púlsar. Poco tiempo después del descubrimiento de los púlsares, en 1968, *Thomas Gold* (1920 - 2004) y Sir *Fred Hoyle* (1915 - 2001) identificaron estos objetos como estrellas de neutrones que rotan rápidamente y con intenso campo magnético.

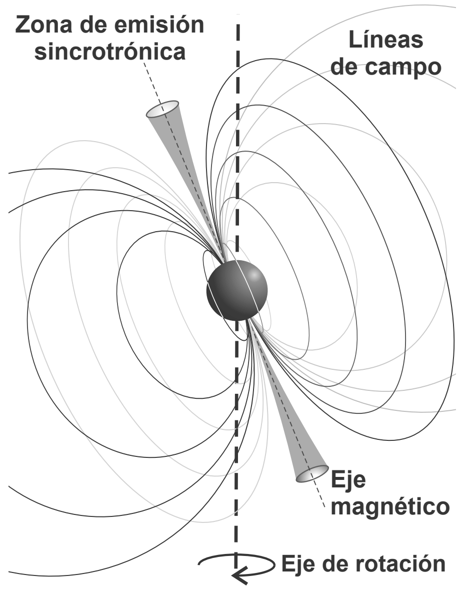


Figura 4.47: En general en una estrella el eje de rotación no coincide con el eje de los polos magnéticos.

La forma más común de detectar estrellas de neutrones es a través de la detección de pulsos de radio que emiten, y aunque pueden ser detectados en lugares aleatorios, es de especial interés la búsqueda en remanentes de supernovas.

Una estrella de neutrones tiene una intensa gravedad, si ésta tiene poca rotación y débil campo magnético (las viejas por ejemplo), tiene mejores condiciones para acretar materia interestelar. El hidrógeno que acumula desde su entorno interestelar, se distribuye por toda la superficie de la estrella de neutrones, en vez de concentrarse sólo en los polos. Esta materia no emite hasta después de unas cuantas horas, tras haberse acumulado una cierta cantidad y calentado su superficie. Cuando esto ocurre, la estrella de neutrones produce fusión termonuclear, produciendo una emisión de rayos X blandos, los que pueden ser observados dentro de un radio de cercanía con respecto al observador. Aunque estos rayos no son emitidos directamente por la estrella, evidencian su presencia por los efectos que genera el polvo en sus alrededores.

Otra forma distinta de detección es a través de sistemas estelares binarios, una forma es observar una estrella individual que aparentemente no tiene compañera, pero que orbita una estrella invisible, y a través de la órbita que describe en torno de ésta, puede ser evidenciada, otra forma es cuando la estrella de neutrones posee como compañera una estrella común o gigante roja, la estrella de neutrones puede, bajo ciertas condiciones, acretar material de la compañera, formándose un disco de acreción, donde se producen grandes explosiones de rayos X, evidenciando a través de éstos la estrella de neutrones.

Finalmente, otra forma de detección indirecta es a través de efecto de *microlentes gravitacionales* que produce la estrella de neutrones al pasar frente a una estrella luminosa. Las lentes gravitacionales, son un fenómeno predicho por la teoría general de la relatividad. Ocurre cuando la luz de una estrella se desvía al pasar por las inmediaciones de un cuerpo, en este caso, en la cercanía de una estrella. Este hecho ha sido comprobado en eclipses de Sol y en galaxias actuando a modo de lentes. En el caso de estrellas compactas, como es el caso de estrellas de neutrones, se utiliza el hecho que actúa como lente al interponerse entre la Tierra y una estrella más lejana y brillante.

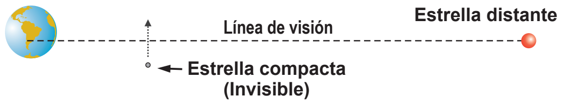


Figura 4.48: Un objeto, en este caso una estrella compacta, al pasar frente a una estrella brillante actuará como lente incrementando su brillo.

4.2.6.4. Hipernovas

Las hipernovas son supernovas producidas por estrellas progenitoras muy masivas ($M_\bigstar > 20 - 30\ M_\odot$), típicamente una estrella Wolf-Rayet[23], en cuyo colapso nuclear, parte de la materia que ha rebotado vuelve a caer, incrementando la masa de la protoestrella de neutrones más allá de su límite de estabilidad (figura 4.41), produciendo la formación de un agujero negro en cuyo entorno se forma también un disco de acreción. El colimante efecto del disco de acreción asociado a intensos campos magnéticos, hace que dos chorros de plasma extremadamente energéticos salgan desde el interior de la estrella a rapideces cercanas a la de la luz, perforándola literalmente (figura 4.49).

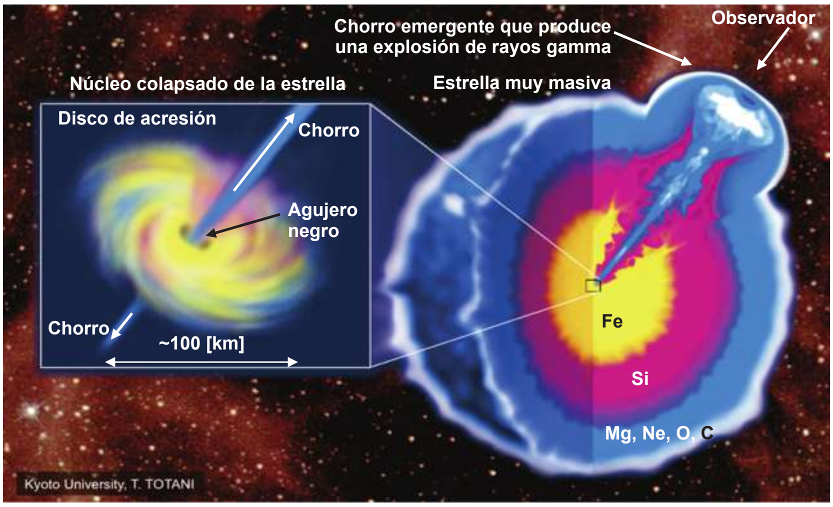


Figura 4.49: Modelo de hipernova, que explica la formación de un agujero negro en el núcleo en colapso de una estrella muy masiva. La formación estaría acompañada de un disco de acreción y de chorros relativistas que salen desde el interior de la estrella, perforándola. Este modelo explicaría las explosiones de rayos gamma de larga duración, siendo éstos el anuncio del nacimiento de un agujero negro. Créditos: T. Totani, Kyoto University.

Los chorros podrían generar potentes rayos gamma y serían una posible explicación de algunas de las *explosiones de rayos gamma* (GRBs, de sus siglas en inglés: *gamma-ray burst*). Las explosiones de rayos gamma se producirían dentro de los chorros, y la interacción del chorro con el medio interestelar produce un post-resplandor. Las enormes velocidades del chorro hace que la explosión de la estrella como supernova aparezca como un proceso posterior, es decir, el chorro se adelanta a la explosión de la supernova.

Dado que las estrellas tan masivas son muy poco abundantes, también serían poco frecuentes las hipernovas: se estima que un evento de esta naturaleza puede ocurrir en nuestra galaxia cada 200 millones de años.

4.2.6.5. Agujeros negros estelares

Un agujero negro es un objeto tan masivo que la velocidad de escape en una región encerrada por una frontera puede ser igual o mayor a la de la luz, debido a lo anterior sería invisible.

[23] Las estrellas Wolf-Rayet son estrellas muy masivas y evolucionadas que sufren grandes pérdidas de masa debido a intensos vientos estelares.

La idea de un cuerpo tan denso que ni la luz pudiese escapar de él, fue por primera vez propuesta en un artículo de 1783 enviado a la Royal Society por el filósofo natural y geólogo *John Michell* (1724 - 1793). Poco después, en 1796, el físico y matemático *Pierre-Simon Laplace* (1749 - 1827) propone la misma idea en las dos primeras ediciones de su libro "*Exposition du Système du Monde*". Posteriormente se confirmó que la luz era una onda, por lo que la idea fue descartada. En 1913, *Einstein* mientras intentaba desarrollar la relatividad general predijo que la trayectoria de la luz era influenciada por la interacción gravitatoria. En 1915, el físico y astrónomo alemán *Karl Schwarzschild* (1873 - 1916) usando las recién publicadas *ecuaciones de campo de Einstein*[24], para un cuerpo de simetría esférica, encontró que si éste se concentraba a un tamaño menor a cierto radio, conocido hoy como *radio de Schwarzschild*, ni siquiera la luz podría escapar. La idea fue desprestigiada por el mismo Einstein indicando que no era más que una solución matemática y no física. En 1939, *Robert Oppenheimer*[25] (1904 - 1967), usando la relatividad general, estudió cuerpos en colapsos gravitacionales dando la explicación teórica cómo se pueden formar en la naturaleza las estrellas de neutrones y los objetos encontrados matemáticamente por Schwarzschild. Estos últimos, en 1969 fueron denominados por *John Wheeler* (1911 - 2008) como "*agujeros negros*".

Un agujero negro está formado por una gran cantidad de masa que ocupa un muy pequeño volumen, producto de esto, su fuerza de gravedad es tal (en realidad la curvatura del espacio-tiempo), que nada puede escapar dentro de un cierto radio o frontera.

En un *agujero negro de Schwarzschild* la superficie en la cual la velocidad de escape es igual a la rapidez de la luz se denomina "*horizonte de los eventos*". En un punto, interior al horizonte de los eventos, donde la masa se concentra, la curvatura del espacio-tiempo se vuelve infinita. No existe una teoría que explique lo que sucede en dicho punto. A este punto que no pertenece al Universo se le denomina "*singularidad*". En la singularidad no existe ni el tiempo ni el espacio.

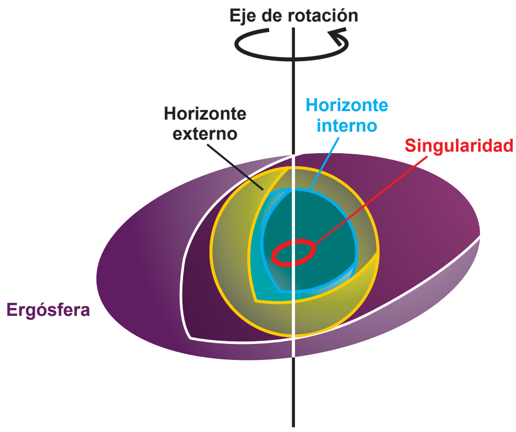


Figura 4.50: Estructura de un agujero negro tipo estelar (rotante), se observa el horizonte de los eventos y la denominada ergósfera. Créditos: N. Rumiano.

El agujero negro de Schwarzschild es un tipo muy particular de agujero negro, pues no rota ni posee carga eléctrica. Aquel que posee rotación se denomina *agujero negro de Kerr*, este tipo de agujero negro debido a la rotación no es esférico sino elipsoidal, en su interior se encuentra un horizonte de eventos con su respectiva singularidad, que debido a la rotación tiene forma de anillo. Este agujero posee una nueva frontera, *la ergósfera*, una región donde la luz aún puede escapar pero cuyo giro induce altas energías en los fotones que la cruzan.

Otra posibilidad es que el agujero negro además de rotar tenga carga eléctrica, en este caso se denomina *agujero negro de Kerr-Newman* y éste posee tres fronteras: un horizonte denominado de *Cauchy*, un horizonte de eventos externo y una ergósfera. Un agujero negro

[24] Las ecuaciones de campo de Einstein son las ecuaciones de la relatividad general, es decir, de su nueva teoría de la gravitación.

[25] Oppenheimer es más conocido por dirigir años más tarde el proyecto Manhattan para construir la bomba atómica.

estelar debiera ser del tipo de Kerr, ya que las estrellas rotan y no poseen carga eléctrica neta, y como hemos visto, se formaría a partir de una estrella masiva que en su etapa final de vida ha colapsado gravitacionalmente y cuyo colapso no pudo ser detenido por la presión de degeneración de los electrones ni la de los neutrones.

4.3. Bibliografía del capítulo

- *Astronomy: A self teaching guide*. D. Moché. *Wiley*. 4th edition 1993.
- *Fisica solare*. E. Landi Degl'Innocenti. *Springer Verlag*. 2007.
- *An introduction to modern astrophysics*. B. Carroll & D. Ostlie. *Pearson Addison-Wesley*. 2nd edition 2007.
- *Astrofísica General*. A. Gutiérrez & H. Moreno. *Editorial Universitaria*. 1980.
- *Supernovas*. M. Hamuy & J. Maza. *Ediciones B*. 2008.
- *Las siete maravillas del cosmos*. J. Narlikar. *Ediciones Akal*. 2003.
- *Solar-Neutrino Problem Solved*. Alan MacRobert & David Tytell. *Sky & Telescope*, September 2001, p. 18.

Diversos articulos de las siguientes direcciones web:

- The Solar Interior
  http://solarscience.msfc.nasa.gov/interior.shtml
- Qué se Esconde Bajo una Mancha Solar:
  http://ciencia.nasa.gov/headlines/y2001/ast07nov_1.htm
- Sounds of a star:
  http://spaceflightnow.com/news/n0107/06astroseismology/
- Estrellas de neutrones y púlsares:
  http://www.astroscu.unam.mx/neutrones/NS-Pub/estructura.html
- Internal structure of a neutron star:
  http://heasarc.nasa.gov/docs/objects/binaries/neutron_star_structure.html
- Hipernovas:
  http://www.astrosurf.com/blazar/articulo/HIPERNOVAS.html
- Gamma-Ray Bursts:
  http://www.kusastro.kyoto-u.ac.jp/~totani/en/grb_image/index.html
- Kerr black hole:
  http://www.daviddarling.info/encyclopedia/K/Kerr_black_hole.html

Capítulo 5

Astronomía planetaria



Objetivos de aprendizaje

Objetivos generales

- Identificar diferentes tipos de cuerpos que componen el sistema solar, la Vía Láctea y el Universo.

Objetivos específicos

- Identificar y clasificar los componentes del sistema solar.
- Describir las características generales y particulares de los planetas.
- Reconocer y comprender, de forma elemental, procesos físicos que conllevan a la formación de planetas.
- Diferenciar la diversidad de las técnicas de detección de planetas extrasolares.
- Reconocer y clasificar los planetas descubiertos en torno de otras estrellas.
- Mostrar la gran diversidad de los planetas y los sistemas planetarios en torno de otras estrellas.

Temas

- El sistema solar
- Formación del sistema solar
- Exoplanetas
- Revisión del modelo de formación planetaria

Introducción

La llegada del renacimiento trajo consigo importantes cambios en la visión del mundo. Galileo observó las manchas solares y gracias a ello, descubrió la rotación del Sol. Observando las fases de Venus, comprobó que éste orbitaba en torno del Sol. Observó además la revolución de cuatro satélites en torno de Júpiter.

Por otra parte, observaciones realizadas por monjes indicaban una posible explosión en la Luna y Tycho Brahe observó la aparición en la bóveda celeste de una "*stella nova*". El cielo no era inmutable después de todo. El modelo heliocéntrico modificado por Kepler destrona definitivamente a la Tierra del centro del Universo, relegándola a la categoría de planeta; uno entre muchos.

La astronomía renacentista continua la tradición helénica de ser preponderantemente planetaria y lo seguirá siendo hasta que en el siglo XIX se convierta en estelar y un siglo más tarde en extragaláctica.

La llegada de la exploración espacial, el envío de naves, orbitadores y otros, permitió poder tomar muestras directas y poder realizar experimentos, por lo que el sistema solar prácticamente dejó de ser estudio de la astrofísica, y pasó a ser parte de otras ciencias, por lo que muchos de los conocimientos que se presentarán en la primera parte de este capítulo no han sido obtenidas con las técnicas observacionales de la astronomía.

A partir de la última década del siglo XX gracias a los telescopios espaciales, los grandes telescopios en tierra y al desarrollo de nueva instrumentación, los planetas han vuelto al campo de la astrofísica a través del estudio de la formación planetaria y los exoplanetas.

5.1. Sistema solar

El *sistema solar* corresponde al conjunto de cuerpos celestes que se mueven influenciados directa o indirectamente por la gravedad del Sol.

Como hemos visto en el capítulo anterior, el Sol es una estrella que se encuentra aproximadamente en la mitad de su vida. Se formó hace unos 4.600 millones de años de una nebulosa de gas y polvo. Más del 99 % de la masa del sistema planetario está contenida en el Sol.

Los planetas, la mayoría de los satélites y todos los asteroides se mueven siguiendo órbitas elípticas en sentido antihorario vistas por sobre el polo norte solar.

Algunos cuerpos menores orbitan en zonas pseudo-toroidales[1] denominadas cinturones. Existen dos de ellos uno interno denominado *cinturón de asteroides* y uno externo denominado *cinturón de Kuiper*.

Existen también cuerpos de tamaños microscópicos denominados *polvo interplanetario*. El origen de este polvo es producto de la evaporación de cometas y del escape de material proveniente de los diferentes cuerpos.

El espacio interplanetario posee también plasma, es decir, gas y partículas cargadas denominadas gas interplanetario.

El límite exterior del sistema solar se encuentra relacionado con el término de la supremacía gravitatoria principalmente solar y se denomina *heliopausa*. En realidad, la heliopausa está definida en función del viento solar. Luego de la heliopausa la influencia pasa

[1] Del griego $\tau\acute{o}\rho o\varsigma$, es una zona del espacio encerrada por una superficie de revolución generada por una circunferencia que gira alrededor de una recta de su plano, que no pasa por el centro.

a ser principalmente debido a otras estrellas. Se estima que ésta puede encontrarse a unas 100 [UA], es decir, unos 15.000 millones de kilómetros del Sol.

5.1.1. Ampliando el sistema solar

A partir del renacimiento, el modelo del sistema solar estaba constituido por el Sol y, considerando a la Tierra, 6 planetas orbitándolo. En torno de la Tierra está la Luna y en torno de Júpiter los cuatro satélites descubiertos por Galileo.

En 1655 *Christiaan Huygens* (1629 - 1695) descubre un satélite en torno de Saturno, el que fue denominado *Titán*. Aunque con su telescopio pudo haber descubierto varios satélites más, la idea que el número de satélites en el sistema solar no podía superar al número de planetas posiblemente se lo impidió. Así el descubrimiento de Titán, el sexto satélite, completaba la totalidad esperada de satélites. Huygens descubrió la razón de la triplicidad de Saturno observada por Galileo. Durante el invierno boreal de 1655/1656 comprendió que el planeta debía estar rodeado por un delgado anillo de gran extensión radial pero que no toca al planeta. Sus observaciones de Marte, le permitieron descubrir manchas oscuras sobre el disco del planeta. Con ello midió el período de rotación, cerca de 24 horas, y también descubrió los casquetes polares del planeta.

Giovanni Domenico Cassini (1625 - 1712), realizó una descripción exacta de las bandas y las manchas que presenta el disco de Júpiter. Hizo una descripción de una gran mancha roja que perdura hasta nuestros días. Determinó el corto período de rotación de Júpiter en 9 [h] 56 [min], y también un notable achatamiento del planeta. Observó pequeñas manchas oscuras sobre el planeta, las que interpretó como las sombras proyectadas por los satélites sobre Júpiter. Calculó las posiciones de los satélites y sus eclipses, las que publicó en 1668: "*Ephemerides Bononienses Medicaerum Siderum*". Estas tablas permitieron posteriormente a *Ole Rømer* (1644 - 1710) determinar la rapidez de la luz. El 25 de octubre de 1671, descubrió un segundo satélite de Saturno, *Japeto*. Las periódicas variaciones de brillo que observó a través de la órbita de Japeto, le permitieron concluir que, al igual que lo hace la Luna, el satélite presenta la misma cara a Saturno. Un año más tarde, el 23 de diciembre de 1672, encontró un tercer satélite, *Rhea*. El 21 de marzo de 1684 descubrió un cuarto y un quinto satélite de Saturno, *Thetis* y *Dione*. No bastando con todo lo anterior, Cassini observó en 1675, que el anillo de Saturno presenta una división, entre uno interno y otro externo, en la actualidad, a la división del anillo se le conoce como la *división de Cassini*. Además sugirió que el anillo esta formado por un enjambre de pequeños cuerpos que giran en torno al planeta central.

Entre 1671 y 1673 un astrónomo que trabajaba con Cassini, *Jean Richer* (1630 - 1696) viajó a Cayena, capital de la Guayana Francesa. En 1672, cuando Marte se encontraba en oposición, Richer en Cayena y Cassini en París, lo observaron (a varios miles de kilómetros de distancia). Por triangulación, Cassini obtuvo la distancia a Marte en kilómetros. En la oposición se puede calcular muy fácilmente la distancia a Marte en unidades astronómicas gracias a la tercera ley de Kepler, de esta forma, se obtuvo el valor de la unidad astronómica en kilómetros. Cassini determinó 9,5" para la paralaje solar lo que corresponde a una distancia Tierra-Sol, equivalente a 138.000.000 [km]. El mejor valor de la paralaje solar actualmente es de 8,7941", lo que corresponde a un valor de 149.597.892 $\pm$ 5 [km] para la Unidad Astronómica.

El 13 de marzo de 1781 Sir *Friedrich Wilhem Herschel* (1738 - 1822), un músico alemán y astrónomo de la corte del rey Jorge III de Inglaterra, reportó a la Royal Society un

cometa en una memoria titulada: "*Account of a Comet*". El astrónomo finlandés *Anders Lexell* (1740 - 1784), calculó la órbita del supuesto cometa de Herschel, concluyendo que, por su órbita, no era un cometa sino un planeta, el séptimo planeta y el primero descubierto desde la antigüedad. El astrónomo alemán *Johann Elert Bode* (1747 - 1826), propuso el nombre de *Urano* en honor al dios griego, padre de Cronos, aunque hasta 1850 el *HM Nautical Almanac* siguió listándolo como *Georgium Sidus* (la estrella de Jorge) en honor al rey. Más tarde, se advirtió que en 1690 *John Flamsteed* lo había catalogado como una nueva estrella, 34 Taurii.

En 1801 el monje y astrónomo *Giuseppe Piazzi* (1746 - 1826) mientras realizaba observaciones en el recientemente creado observatorio de Palermo (Sicilia) para un gran catálogo estelar (publicado en 1814 con las coordenadas para 7.646 estrellas) observó entre el 1 y el 24 de enero un objeto de séptima magnitud que fue cambiando de posición respecto a las estrellas de fondo. El día 24, envió la información de su descubrimiento al director del Observatorio de Berlín, *J. Bode*. En ese momento existía la búsqueda de un planeta predicho por la relación numérica que encontró *J. Daniel Titius* (1729 - 1796) y que reproducía con una buena aproximación los semi-ejes mayores de las órbitas planetarias. En 1772 Titius publicó la famosa relación en una nota de pie de página de un libro que tradujo, la cual pasó desapercibida hasta que Bode la dió a conocer en 1778. Por lo que dicha relación pasó a ser conocida como la *ley de Titius-Bode*.

Cuando Bode recibió la carta de Piazzi, el nuevo objeto no era observable y pese a que Piazzi intentó reconstruir la órbita, no le fue posible (Piazzi era también matemático). Afortunadamente el gran matemático alemán *Carl Friedrich Gauss*[2] (1777 - 1855) estaba trabajando en el problema de órbitas planetarias. Conociendo la pérdida del objeto de Piazzi y las observaciones realizadas, Gauss usó su nuevo método de los mínimos cuadrados (no publicado hasta 1809) lo que le permitió predecir la posición correcta. La órbita obtenida se encuentra ubicada entre Marte y Júpiter, con un período cercano a 4 años y con una distancia media al Sol de 2,77 [UA], lo cual está en concordancia con la ley de Titius-Bode[3]. Piazzi lo designó con el nombre de *Ceres*, la diosa tutelar de Sicilia.

El 28 de marzo de 1802 el médico *Heinrich Wilhem Mathias Olbers* (1758 - 1840) descubrió un segundo pequeño planeta, denominado *Palas*. La órbita de Palas es muy similar a la de Ceres pero con una mayor inclinación con respecto a la eclíptica ($\sim 35°$). En 1804, *Karl Ludwig Harding* (1765 - 1834), del Observatorio de Göttingen, descubrió otro pequeño planeta: *Juno* y luego Olbers, en 1807, descubrió *Vesta*. Los cuatro nuevos planetas se encontraban en la ubicación indicada por la ley de Titius-Bode, pero todos ellos eran muchísimo más pequeños que Júpiter o Marte, pues su brillo alcanza sólo a la milésima parte de éstos y sus apariencias en el telescopio no son discoidales como los planetas, sino que puntuales como las estrellas. Debido a lo anterior fueron denominados *planetoides* o *asteroides*.

En la actualidad se sabe que Ceres tiene cerca de 1.000 kilómetros de diámetro, lo

[2]A los nueve años, Gauss asiste a su primera clase de aritmética, su profesor J. G. Büttner dió a los alumnos la tarea de calcular la suma de los 100 primeros números, quizás, con la intensión de mantenerlos ocupados toda la hora. Sin embargo, a penas acababa de plantear el problema, el joven Gauss escribe 5.050 en su pizarra, y mientas la deposita en la mesa exclama "*Ligget se!*" (¡Ahí está!). El resultado, correcto por cierto, lo obtuvo dándose cuenta que la suma de la primera y la última cifra daba el mismo resultado que la suma de la segunda y la penúltima, y así sucesivamente, es decir: $1+100 = 2+99 = 3+98 = \cdots = 101$, y como hay 50 parejas de números, el resultado es $101 \cdot 50 = 5050$.

[3]En realidad la pseudo-ley de Titius-Bode no es válida y solo fue una coincidencia que Ceres se encontrara justo allí.

que es notablemente menor que cualquier planeta, incluso más pequeño que la Luna y los grandes satélites de Júpiter y Saturno. Desde el año 2006, *Ceres* ha dejado de ser un asteroide para convertirse en un *planeta enano*.

Tras el descubrimiento de Urano, se observó que las órbitas de Urano, Saturno y Júpiter no se comportaban exactamente como predecían las leyes de Kepler y de Newton. Estas perturbaciones se podían explicar con la existencia de un octavo planeta. Resolviendo el clásico problema de perturbaciones a la inversa *Urbain Jean Joseph Le Verrier* (1811 - 1877) pudo calcular su posición el 31 de agosto de 1846. El nuevo planeta, denominado *Neptuno*, pudo ser observado el 23 de septiembre de 1846 por *Johann Gottfried Galle* (1812 - 1910) a menos de un grado de la posición calculada por *Le Verrier*. Recientemente se ha descubierto que Neptuno había sido observado por Galileo, durante sus observaciones de Júpiter, en enero de 1613, y aunque en una de sus observaciones le pareció que la "estrella" había cambiado de posición, al parecer no le prestó mayor atención.

Posteriormente se observaron perturbaciones en las órbitas de Urano y Neptuno, las cuales podían ser explicadas por un noveno planeta de unas dos masas terrestres. El 18 de febrero de 1930,*Clyde Tombaugh* (1896 - 1997) que realizaba observaciones desde el observatorio Lowell en Arizona en busca del noveno planeta, encontró, luego de varios años de infructuosas búsquedas, en un par de imágenes de una región en las cercanías de δ geminorum, un objeto que luego de varios días había cambiado de posición (Figura 5.1).

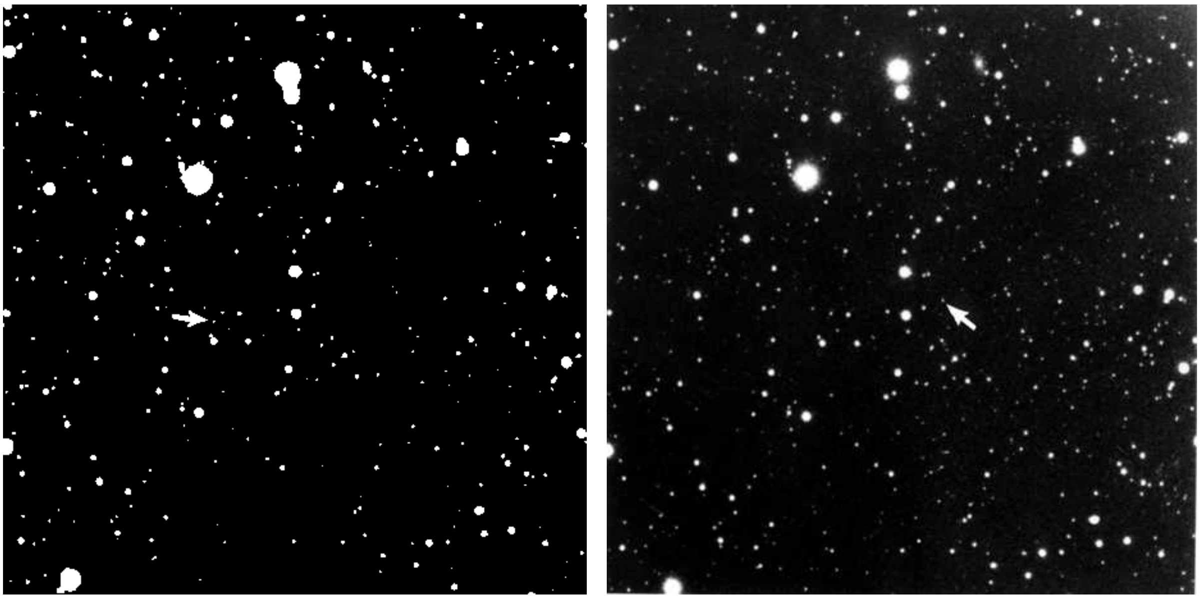


Figura 5.1: Imágenes tomadas por Clyde Tombaugh en el observatorio Lowell los días 23 de enero (izquierda) y 29 de enero de 1930 (derecha). Usando una técnica de alternancia de las imágenes Tombaugh encontró el 18 de febrero de 1930 un cuerpo celeste que cambia de posición (marcado en ambas imágenes). Créditos: the Lowell Observatory Archives.

El nuevo planeta fue nombrado *Plutón* (PL en honor a *Percival Lowell*[4]). Y dado lo poco luminoso que resultó, las primeras estimaciones de masa se redujeron a una décima parte de la masa pensada inicialmente. Durante los años 60 se ajustaron los cálculos de las órbitas de Urano y Neptuno y la estimación de la masa de Plutón nuevamente se redujo a una décima parte del valor anterior. Ya en la década de 1970, se sabía que Plutón

[4]Percival Lowell (1855 - 1916) fue un acaudalado aficionado a la astronomía fundador del Lowell Observatory en Flagstaff, Arizona. En los últimos 8 años de su vida se dedicó a la búsqueda del Planeta X, que más tarde sería descubierto por Tombaugh.

era de tipo rocoso y no gaseoso. Los tránsitos y ocultaciones mutuos con su compañero Caronte durante la segunda mitad de la década de 1980 (figura 5.51) permitieron estimar el diámetro de Plutón en unos 2.280 [km].

Hacia la década de 1990 se comenzaron a descubrir objetos transneptúnicos, que al igual que Plutón, están en resonancia orbital 3:2 con Neptuno, esto es, tres vueltas del objeto transneptúnico coinciden con dos vueltas de Neptuno. Debido a esto, aunque crucen la órbita de Neptuno, éste no los puede expulsar gravitatoriamente.

Dado que: la resonancia, la distancia al Sol, la inclinación y excentricidad de la órbita de estos objetos son muy parecidas a las de Plutón (ver tabla 5.3), se les denomina *plutinos* (pequeños plutones). Los plutinos forman la parte interior del cinturón de Kuiper. Aproximadamente la cuarta parte de los objetos conocidos del cinturón de Kuiper son plutinos.

Con la llegada del siglo XXI, se comenzaron a descubrir objetos del tamaño de Plutón y Caronte más allá de la órbita de estos (ver figura 5.53). Ejemplo de ello es el objeto denominado inicialmente como 2003 UB_{313} y posteriormente *Eris* (Discordia en latín) el cual pasó a ocupar el décimosexto lugar de tamaños en el sistema solar, con sus 2.400 [km] de diámetro es algo mayor que Plutón. Además posee un pequeño satélite, Disnomia.

Ya a fines de la década de 1990 quedaba en evidencia que al igual que Ceres, Plutón era un objeto inmerso en un cinturón, en este caso el de Kuiper. Sin embargo, no se llegó a consenso hasta el año 2006 para desclasificar a Plutón de su categoría de planeta.

La perdida de Plutón del estatus de planeta motivó que los astrónomos crearan una nueva clasificación para él y los otros objetos similares, la de *planeta enano*.

5.1.2. Mitología de los dioses que dan nombre a los planetas

Los nombres de los planetas del sistema solar corresponden a los nombres latinos de dioses de la mitología griega. De acuerdo con ésta, el Universo creó a los dioses, al contrario de la mayoría de las mitologías. Antes que los dioses fueran creados, existía Urano (el Cielo) y su esposa *Gea* (la Tierra). Ambos procrearon varios hijos de gran tamaño y de enorme fuerza, los *Titanes*.

Entre los Titanes destacan *Océano* (río que se suponía rodeaba a la Tierra), *Coyo*, *Crío*, *Hiperión* (que será padre del Sol, la Luna y los crepúsculos), *Japeto*, *Mnemosina* (memoria), *Febo*, *Tetis* (esposa de Océano), *Cronos*, los *cíclopes* y los *Hecatónquiros*[5].

Urano ganó el resentimiento de Gea al enviar a varios de sus hijos al *Tártaro* (lugar más profundo del inframundo). Gea reunió a Cronos y sus hermanos para incitar una rebelión en contra de Urano. Cronos, el más joven de sus hijos, fue el único dispuesto a ayudar a su madre, tendió una emboscada a Urano y con una hoz le castró. Luego de mutilarlo le desterró pasando a ocupar su trono. Antes de ser desterrado, Urano profetizó a Cronos que sufriría el mismo destino, sería derrocado por uno de sus hijos. Debido a la profecía, Cronos devoraba a sus hijos a medida que nacían, pero al nacer *Zeus*, su esposa Rea, le dió a Cronos una piedra envuelta con pañales para que la devorara, sin que se percatase de la supervivencia de éste. Zeus ya convertido en adulto, obligó a su padre a regurgitar a todos sus hijos, y junto a ellos, le declaró la guerra. Luego de diez años, Zeus obtuvo la victoria. Cronos, expulsado del Olimpo se dirigió a Italia.

[5]Los Hecatónquiros, conocidos también como centimanos, eran en la mitología griega, gigantes con cien brazos y cincuenta cabezas, hijos de Gea y Urano.



Figura 5.2: Pintura de Rubens "*Saturno devorando a un hijo*" (1636). Se encuentra en el Museo del Prado, Madrid - España. Observe que en la parte superior aparece la forma triple del planeta Saturno tal como lo describiera Galileo.

Tras vencer a Cronos, Zeus y sus hermanos se repartieron el mundo, echándolo a la suerte: *Poseidón* (Neptuno) obtuvo el mar, *Hades* (Plutón) el inframundo, y Zeus el cielo y las regiones superiores; la Tierra quedó al dominio de todos ellos.

Zeus es el más poderoso de los inmortales, y al que todos obedecen, incluso es el único dios obedecido por las *Moiras*, las personificaciones del destino. Como dios del cielo y de los fenómenos celestes, es el causante de todos los fenómenos meteorológicos, y de los vientos que invocaban los navegantes, y por lo mismo había muchas montañas consagradas a él. Habitaba en el monte Olimpo, en Tesalia, que según la creencia helénica, penetraba en el cielo mismo.

Zeus usa como arma el trueno, el rayo o el relámpago dado por los Cíclopes cuando liberó del Tártaro a los hermanos de Cronos: los Hecatónquiros y los Cíclopes. Cuando agita su égida (escudo) produce los huracanes y las tempestades.

Zeus es padre de dioses y de los hombres. Con su hermana y esposa *Hera* tuvo a *Ares* (Marte) y *Hefestos* y una hija, *Hebe*. Sus frecuentes infidelidades, sea con diosas o mortales, producen la ira y deseos de venganza de Hera, no sólo contra ellas sino también contra los hijos de éstas.

Zeus es el fundador de las leyes y del orden, de la autoridad real y su sabiduría regula todas las cosas, y administra a su antojo los bienes y los males a los mortales.

Poseidón (Neptuno) es el dios de todas las aguas y mares. Habitaba en un palacio submarino frente de la costa de Egas. Usaba un carro tirado por caballos y va equipado con un tridente, el que es considerado como símbolo de su poder. Agitando su tridente produciría las olas, y golpeándolo en tierra hace brotar fuentes y manantiales. Canaliza su ira produciendo tormentas, tempestades, sismos y terremotos. Habría dado forma a las costas rompiéndolas para formar acantilados y suavizándolas para formar playas y bahías.

Con su esposa, la *Nereida Anfitrite*, tuvo a *Tritón*, un dios, mensajero de las profundidades marinas con forma de hombre desde la cabeza hasta la cintura, y de pez el resto. También tuvo otras esposas como: *Halia, Amimone, Toosa, Tetis, Clito* y *Ceres* y habría violado a *Medusa*, la hermosa doncella, y sacerdotisa del templo de Atenea, producto de

lo cual la enfurecida diosa habría transformado su hermoso cabello en serpientes.

Hades (Plutón) es el dios del submundo. Su nombre significa el rico, ya que en las profundidades de la tierra se encuentran los metales y rige la fecundidad del suelo. Su símbolo es el casco que hace invisible a su portador, usaba un carro de oro y se le suele representar con el cuerno de la abundancia en la mano.

Hades aunque rara vez sale de sus dominios, raptó a *Perséfone*, hija de Zeus, mientras recogía flores cerca de la fuente Aretusa, en Sicilia, a quien luego hizo su esposa.

El submundo es la morada de los muertos. Al morir, *Hermes* guiaba al muerto hasta el río Estigia, una vez allí, el barquero *Caronte* lo recogía en su barca y previo pago lo llevaba al otro lado. Quienes no tenían el dinero, vagaban eternamente por la costa, sin medios para cruzar el río. En la otra rivera, se encontraba *Cerbero*, el perro guardián de tres cabezas quien junto a Caronte tenía la misión de vigilar que no pasase ningún ser vivo y que ningún muerto saliera. Hermes conducía a los muertos ante un tribunal compuesto por *Minos* (rey de Creta), *Radamantis* (hermano de Minos) y *Éaco* (rey de Egina). Los muertos eran enviados por tres senderos según sus actos: por el primero se enviaba a los mediocres, y llegaba a la llanura de Asfódelos, por el segundo, se enviaba a los afortunados, y llegaba a los *Campos Elíseos*, y por el último, se enviaba a los delincuentes y criminales, y llegaba al *Tártaro*, que es un lugar de tormento y sufrimiento eternos, donde también se encontraban dioses, semidioses e hijos de dioses y monstruos.

Hermes (Mercurio) es el dios olímpico que poseía la virtud de elocuencia, razón que lo hizo desempeñarse como mensajero de los dioses, y como tal participó en un gran número de mitos, también, y como hemos visto, guiaba a los muertos hacia el inframundo. Es hijo de Zeus y Maya, la mayor y más bella de las *Pléyades.*

Afrodita (Venus) es la hermosa diosa olímpica que personifica el amor carnal, la lujuria, la belleza, la sexualidad y la reproducción. Afrodita nació de la espuma producida por los genitales de Urano que flotaban en el mar, lugar donde los arrojó Cronos luego de cortárselos. Homero cuenta otro origen, que fue hija de Zeus y de Dione.

Afrodita interviene en un gran número de mitos. Unos de los más famosos está relacionado con la guerra de troya: dioses y mortales fueron invitados a la boda de Peleo y Tetis (futuros padres de Aquiles). La diosa Eris (Discordia), que no había sido invitada, arrojó entre las diosas una manzana dorada con la inscripción “para la más hermosa”. Afrodita, Hera y Atenea, asumiéndose las más hermosas, reclamaron la manzana y pidieron a Zeus decidiera quien sería la propietaria del presente. Zeus, no quizó dar el favor a ninguna y dejó la elección en manos del mortal Paris de Troya. Las tres diosas ofrecieron presentes a Paris para que decidiese en su favor, Hera ofreció un reino, Atenea ofreció sabiduría, fama y gloria en la batalla y Afrodita ofreció darle a la mujer mortal más hermosa del mundo. Paris eligió a Afrodita y la mujer mortal fue Helena, cuyo rapto por parte de Paris dió pié a la guerra de Troya.

Afrodita era esposa de Hefesto (Vulcano) el dios del fuego y la forja. Se dice que fue Zeus quien les unió para evitar que fuera la causa de disputas entre los dioses. Otra versión indica que Hefesto consigue esposarse con Afrodita exigiendo su mano como condición a la liberación de su madre, Hera a quien había tomado como prisionera en venganza por haberle expulsado del Olimpo por sus deformidades y feo aspecto. Afrodita no siendo feliz en su matrimonio, encontró consuelo con Ares y Adonis. Dejaremos al lector interesado que averigüe de los mitos asociados a estos amoríos extramaritales.

Ares (Marte) es el dios olímpico de la guerra, hijo de Zeus y Hera, aunque una variante del mito del nacimiento de Hefesto es justamente con Ares ocupando el lugar de Hefesto:

Ovidio cuenta que Hera estando en casa de *Flora*, usó una flor que poseía ésta y que permitía a las mujeres quedar embarazadas aunque fuesen éstas estériles. De esta forma Hera al tener contacto con esta flor habría engendrado a Ares.

Ares es la personificación de la fuerza bruta y la violencia, es agresivo e impetuoso, no respeta las leyes y es indiferente a la justicia, por lo que era impopular tanto para los dioses como para los hombres.

En la Ilíada se describe a Ares como un robusto guerrero de cuerpo enorme. Equipado con una coraza, un casco brillante, un escudo y una espada. A veces combate a pie y otras veces montado en un carro tirado por dos o cuatro caballos. Suele ir acompañado de sus hijos *Fobos* (Terror) y *Deimos* (Temor).

Cuando combate, se lo describe enloquecido, dominado por el frenesí del combate. Quizás por ello es derrotado en numerosas ocasiones, y no solo por dioses, como ocurre en la *Titanomaquia* (Guerra de Titanes), y cuando es humillado por Atenea, sino que también por semidioses, como cuando es burlado por *Heracles* y por hombres, como cuando fue herido por *Diomedes*, durante la guerra de Troya.

De esta forma, en el sistema solar exterior tenemos a representados a Júpiter (Zeus) el dios supremo, representado por el mayor de los planetas, y quinto en distancia del Sol. Además lo acompaña su padre, Saturno (Cronos) sexto en distancia del Sol y segundo en tamaño y esplendor. Urano es el séptimo en distancia y Neptuno (Poseidón) es el octavo en distancia. Plutón (Hades) es un planeta enano en el Cinturón de Kuiper.

En el sistema solar interior están los hijos de Júpiter Marte (Ares), Venus (Afrodita) y Mercurio (Hermes). La Tierra, que ha sido relegada al tercer planeta, en los orígenes de la mitología era el centro y origen de todo, esposa de Urano (dios del cielo) y madre de todos los Titanes, incluído Cronos (Saturno), y abuela de los dioses y de los mortales.

5.1.3. Planetas: definición y clasificación

Los planetas son cuerpos celestes subestelares, de origen distinto al estelar, que orbitan en torno a una estrella, en nuestro caso, en torno del Sol. Según la definición adoptada por la *Unión Astronómica Internacional* (IAU) del 24 de agosto de 2006, un planeta es un cuerpo celeste que:

- Gira alrededor de una estrella.
- Tiene suficiente masa para que su gravedad supere las fuerzas del cuerpo rígido, de manera que asuma una forma prácticamente esférica.
- Ha limpiado la vecindad de su órbita.

Un planeta no puede exceder el umbral de masa que trae como consecuencia la fusión nuclear del deuterio, lo cual lo convierte en otro objeto, uno pseudo-estelar.

Según esta definición, el sistema solar consta de ocho planetas: *Mercurio, Venus, Tierra, Marte, Júpiter, Saturno, Urano* y *Neptuno*.

Plutón, que hasta 2006 se consideraba un planeta, ha pasado a clasificarse como planeta enano, junto a otros objetos similares del Sistema Solar.

La reclasificación de los planetas no es algo nuevo, pues en la teoría geocéntrica los planetas eran el *Sol, la Luna, Mercurio, Venus, Marte, Júpiter* y *Saturno*. La aceptación de nuevas teorías en el renacimiento, como la heliocéntrica, reclasificó a la Tierra como planeta y el Sol y la Luna dejaron de serlo.

Observe cuidadosamente la tabla 5.1 con las características de los planetas. Allí se puede apreciar claramente que existen al menos dos tipos de planetas: los más cercanos que son pequeños y densos, y los lejanos que son gigantes y poco densos.

Planeta	$D_p\ [D_\oplus]$	$M_p\ [M_\oplus]$	$\overline{\rho}_p\ \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right]$	a_p[UA]	e_p	i_p	T_{orb}[a]	T_{rot}[día]	Sat.
Mercurio	0,382	0,06	5430	0,38	0,206	7°00'	0,241	58,6	0
Venus	0,949	0,815	5250	0,72	0,007	3°24'	0,615	-243	0
Tierra	1	1	5520	1	0,017	0°00'	1	1	1
Marte	0,533	0,107	3950	1,52	0,093	1°48'	1,88	1,03	2
Júpiter	11,2	318	1330	5,2	0,048	1°18'	11,86	0,414	≥ 63
Saturno	9,45	95,2	690	9,54	0,053	2°30'	29,46	0,426	≥ 49
Urano	4,01	14,5	1290	19,22	0,047	0°48'	84,01	0,718	≥ 27
Neptuno	3,88	17,1	1640	30,06	0,006	1°48'	164,79	0,671	≥ 13

Tabla 5.1: Tabla de características de los Planetas. Notación: D_p : diámetro del planeta, M_p : masa del planeta, ρ_p : densidad del planeta, a_p : semieje mayor de la órbita del planeta, e_p : excentricidad de la órbita, i_p : inclinación orbital, T_{orb} : período orbital, T_{rot} : período de rotación sobre su propio eje, Sat.: número conocido de satélites naturales. El subíndice $\oplus$ se usa para representar las unidades terrestres.

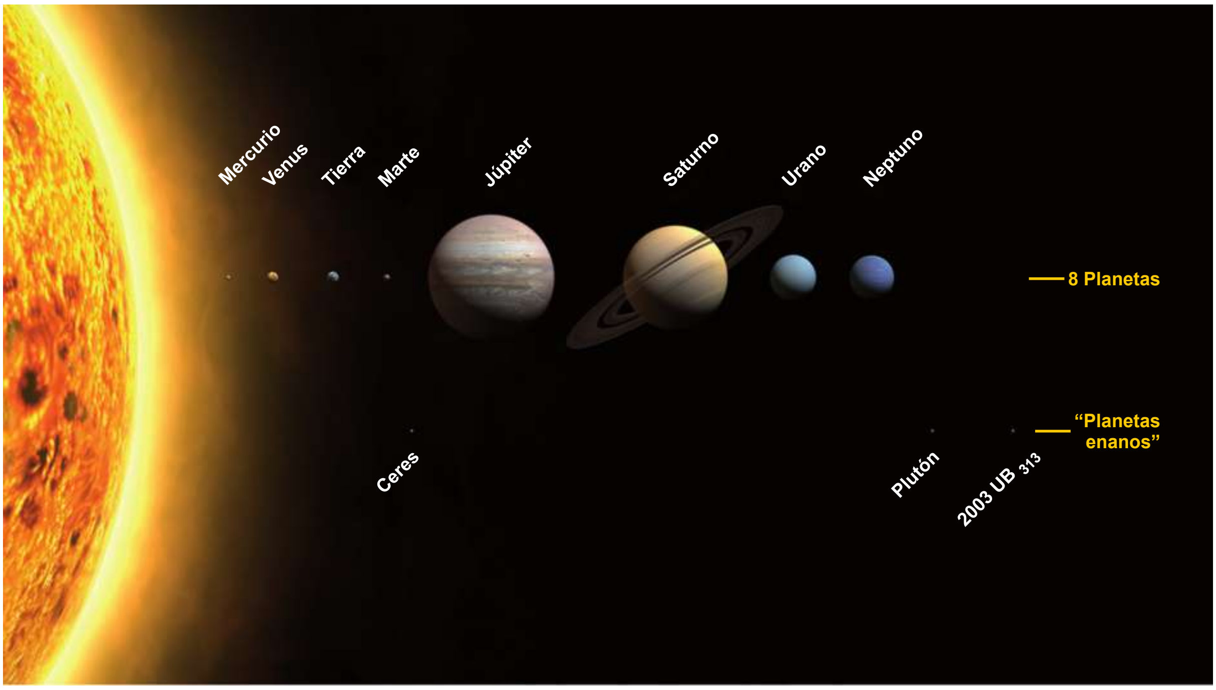


Figura 5.3: El Sol y los planetas del sistema solar. La escala es solo de tamaños relativos y no de distancias. Créditos: International Astronomical Union (IAU).

En general los planetas se clasifican según su estructura en *planetas rocosos*, o aunque menos general se les denomina también *terrestres* o *telúricos* y *planetas gigantes* o, aunque menos general, *jovianos*.

Los *planetas gigantes* son de grandes diámetros y de densidad baja, esencialmente compuestos de hidrógeno y helio. Estos coinciden en el sistema solar con los planetas exteriores.

Los *planetas rocosos* son pequeños y densos, su superficie es rocosa y sólida, aunque puede estar cubierta parcial o totalmente de algún líquido. Estos coinciden en el sistema solar con los planetas interiores.

Los planetas más pequeños son denominados *planetas enanos*, son menos densos que los rocosos y menos masivos, y aunque ésta masa es suficiente para permitirles adquirir forma esférica, no es la suficiente para haber atraído o expulsado los cuerpos de su alrededor.

5.1.4. La Tierra, un modelo de planeta rocoso

La Tierra y la Luna a veces son considerados como un *sistema binario* o *planeta doble* pues la masa de la Tierra es solo 81,293 veces la masa de la Luna, pero además el radio de la Tierra es solo 3,671 veces el radio de la Luna, de esta forma:

$$V_T \approx (3{,}671)^3 \cdot V_L = 49{,}471 \cdot V_L$$

esto es, el tamaño de la Tierra es solo unas 50 veces el de la Luna.



Figura 5.4: La Tierra y la Luna, a una distancia de 6 millones de kilometros. Fotografiado por la Sonda Galileo en el año 1998. Créditos: NASA, JPL, Galileo Project.

El modelo más aceptado, indica que ambos se habrían formado como dos cuerpos independientes. Hace unos 4.600 millones de años un cuerpo más grande que Marte impactó contra la Tierra, lanzando gran parte del material que la conformaba al espacio. Este material formó, debido a la fuerza de gravedad, un disco protolunar. En él, los detritos se fueron juntando hasta formar la Luna. Existen modelos computacionales que indican que este proceso sería extremadamente rápido, incluso menor a un año.

Cuando la Luna se formó, su distancia a la Tierra era de sólo 16.000 [km], las fuerzas de marea producidas por la gravedad terrestre han ido frenando su período de rotación, y la consecuencia directa es que la Luna se ha ido alejando de la Tierra (ver Volumen I, Sección 3.2). Esto ha sido evidenciado gracias a un retrorreflector que instalaron los astronautas de Apolo XVI en la Luna y que midiendo el tiempo que tarda un rayo láser en ir y volver, ha permitido medir con gran exactitud la distancia Tierra-Luna.

Los estudios de las rocas lunares traídas por las misiones Apolo, mostraron que estas no poseían los mismos materiales de la superficie terrestre. Esto es consistente con el modelo de colisión, pues los núcleos ferrosos de ambos planetas habrían quedado principalmente en el núcleo de la nueva Tierra.

Desde cerca del año 600 a. de C. se sabía de la esfericidad de la Tierra, aunque como hemos visto, la llegada de las óbitas elípticas desplaza definitivamente la idea de las esferas perfectas en la naturaleza. La Tierra no es una esfera perfecta, tiene una diferencia de 43 [km] entre el radio ecuatorial y el polar. Es aproximadamente una esfera achatada ligeramente por los polos, esto es denominado un esferoide oblato, que se caracteriza por el radio ecuatorial y su achatamiento u *oblatitud*.

La astronomía planetaria usa la *planetología comparativa*, la que se basa en comparar los planetas entre sí para encontrar semejanzas. Por ejemplo, si observamos la tabla 5.1,

algunos datos como diámetro y masa de otros planetas está dada en función de los valores que tiene nuestro planeta. Si decimos que la masa de Marte es aproximadamente $6{,}424 \cdot 10^{23}$ [kg] no nos dice mucho (excepto que tengamos presente el valor de la masa terrestre), sin embargo, resulta más sencillo hacerse una idea, si decimos que es aproximadamente un 11 % de la masa terrestre ($0{,}11\ M_\oplus$).

Dado que la Tierra es el planeta que más conocemos, resulta natural que se use como planeta rocoso modelo, a partir del cual es posible comparar las propiedades de otros planetas del mismo tipo. La planetología comparativa sirve para generar modelos que permitan explicar la formación y evolución de los planetas.

5.1.4.1. Movimientos de la Tierra

La primera ley de Kepler debe ser ligeramente modificada debido a la existencia de la Luna. Cuando estudiamos el movimiento de cuerpos no puntuales, representamos la trayectoria de un punto geométrico denominado "*centro de masas*", que tiene la propiedad de que se comporta, dinámicamente hablando, como si toda la masa de la Tierra y la Luna estuviera concentrada en él. Para el caso de un sistema multipartícula este punto sería la posición promedio ponderada de todas las masas. En cualquier caso la posición del centro de masas depende de la distribución de materia.

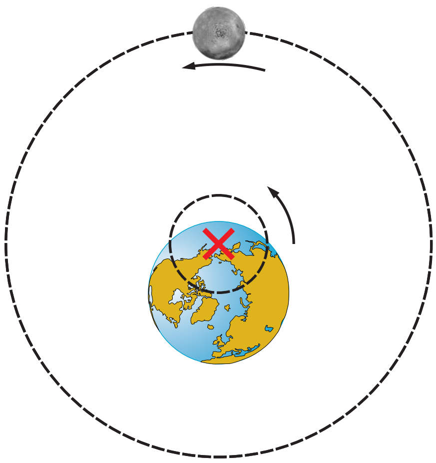


Figura 5.5: Movimiento de la Luna y la Tierra en torno del centro de masas del sistema (marcado con una $\times$).

Por lo que, de acuerdo con la primera ley de Kepler es el centro de masas del sistema Tierra-Luna el que tiene un movimiento elíptico, donde el Sol ocupa uno de los focos. En realidad, dado que forma una elipse muy poco excéntrica y el gran tamaño del Sol, resulta que ambos focos se encuentran en el interior de éste. Este movimiento de rotación en torno del Sol es conocido como *traslación*, y el período es de 365,2564 días.

La Tierra tiene un movimiento de rotación sobre un eje que la atraviesa, en el modelo heliocéntrico y el kepleriano este movimiento da cuenta de la rotación de la esfera celeste, denominado simplemente *rotación*, cuyo período es de 23,9345 horas.

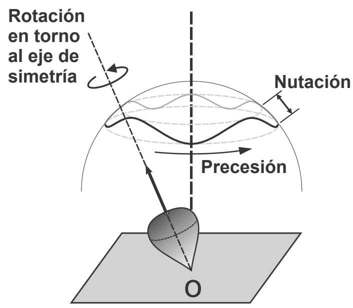


Figura 5.6: Movimiento de rotación, precesión y nutación de un trompo o peón.

Además este eje de rotación posee un *movimiento de precesión* tal como en el movimiento del trompo o peón (figura 5.6), cuyo período es de 25.800 años. La Tierra tiene un cuarto movimiento del eje de rotación, que es una oscilación azimutal, denominado movimiento de *nutación*. Por esta razón, la inclinación de la Tierra respecto a la eclíptica, varía entre 21,5 y 24,5 grados en 41.000 años. En la actualidad la inclinación axial es de 23,45°.

La Tierra posee unos quince movimientos más, cuyo estudio escapa al nivel de este texto.

5.1.4.2. Estructura interna de la Tierra

Conociendo el período orbital de la Luna o cualquier otro satélite artificial podemos usar la tercera ley de Kepler deducida por Newton[6] para calcular la masa de la Tierra. Si además disponemos de algún método para medir el radio: como el de Eratóstenes o el de Posidonio (ver Volumen I, Sección 2.7), podemos calcular el volumen aproximado de la Tierra, y con ambos datos (masa y volumen) podemos calcular la densidad media de la Tierra, obteniéndose que ésta es cerca de 5.5 veces la densidad del agua. Sin embargo, si usamos rocas en la superficie terrestre para estimar la densidad media, obtenemos que esta es sólo aproximadamente la mitad de este valor, por lo que la densidad en el interior de la Tierra debe ser mayor.

Para determinar la estructura terrestre, los geólogos usan la *sismología*. La sismología (del griego $\sigma\varepsilon\iota\sigma\mu\acute{o}\varsigma$; sacudida y $\lambda o\gamma\acute{\iota}\alpha$; tratado, estudio, ciencia) es la rama de la geofísica que se encarga del estudio de terremotos y la propagación de las ondas sísmicas (mecánicas) que se generan en el interior (terremotos) y en la superficie de la Tierra (impactos de meteoritos, explosiones, etc.).

Usando sismógrafos, estudian las ondas sísmicas que viajan a través de la Tierra. Éstas son principalmente de dos tipos: las ondas superficiales y las ondas de cuerpo. Las primeras viajan por la superficie y las otras viajan a través del interior de la Tierra. Existen otros tipos de ondas sísmicas distintas, pero cuya importancia es menor para las ondas producidas en Tierra, sin embargo, son importantes en la heliosismología y la astrosismología.

Las ondas de cuerpo se dividen en *ondas primarias* y *secundarias*. Las ondas primarias u *ondas P*, son ondas *longitudinales* o *de compresión*, esto es, que el medio de propagación es alternadamente comprimido y dilatado en la misma dirección de la propagación (ver Apéndice B), y las ondas secundarias u *ondas S*, son ondas *transversales* o *de corte*, esto es, que el medio de propagación es desplazado alternadamente hacia un lado y hacia el otro, en dirección perpendicular a la de propagación (ver Apéndice B). Los nombres provienen del hecho de que en un sismograma se registran primero las ondas P y después las ondas S, esto se debe a que las ondas S se propagan a velocidad menor ($\sim 58\,\%$ la de una onda P) a través de la corteza. Por otra parte, las ondas S poseen mayor amplitud que las ondas P, y son las responsables de la magnitud del sismo.

En 1909, luego de un terremoto que afectó a una región al sudeste de Zagreb, el geofísico[7] croata, *Andrija Mohorovičić* (1857 - 1936) estudiando los datos obtenidos por los sismógrafos, observó que la rapidez media de las ondas P medida por las estaciones más cercanas eran mayores que las medidas por estaciones sismográficas alejadas más de 200 [km] del epicentro[8] del terremoto. Mohorovičić concluyó que las ondas que llegaron a los sismógrafos más lejanos habían realizado parte de su viaje por una región en la cual las ondas sísmicas viajan a mayor velocidad.

A partir de lo anterior, Mohorovičić comprendió que las ondas sísmicas se refractan y

[6]Newton obtuvo la tercera ley de Kepler usando su ley de fuerza neta junto a la ley de gravitación universal, obteniendo que la constante k vale: $k = \frac{4\pi^2}{GM}$, donde M es la masa del cuerpo central, la de la Tierra para el caso de la Luna o la del Sol para el caso de un planeta.

[7]Mohorovičić en realidad estudió física y matemáticas, y se desempeñó como profesor de geofísica y astronomía, sin embargo, debido a sus trabajos es conocido como un notable meteorólogo y sismólogo.

[8]El epicentro es centro superficial del área de perturbación de un fenómeno sísmico. Es la proyección sobre la superficie terrestre del hipocentro, el punto en el interior de la corteza terrestre, donde se ha originado un sismo.

reflejan y cambian su velocidad de propagación cuando cambian las propiedades físicas del medio (temperatura, densidad, etc.), tal como lo hacen las ondas electromagnéticas que componen la luz cuando atraviesan un prisma. Por lo que midiendo el tiempo que tardan en viajar estas ondas a través de la Tierra, se pueden detectar variaciones en el tiempo de desplazamiento que no pueden explicarse únicamente por las distancias recorridas, sino que se deben a cambios en las propiedades físicas del medio atravesado.

Con todo lo anterior Mohorovičić concluyó que la Tierra está formada por capas alrededor de un núcleo. En la actualidad el modelo más aceptado del interior de la Tierra es, tal como pensó Mohorovičić, un modelo de capas (figura 5.7), que puede construirse con dos criterios diversos:

- Comportamiento mecánico: litósfera, astenósfera, mesósfera, núcleo externo y núcleo interno, más las zonas de transiciones.

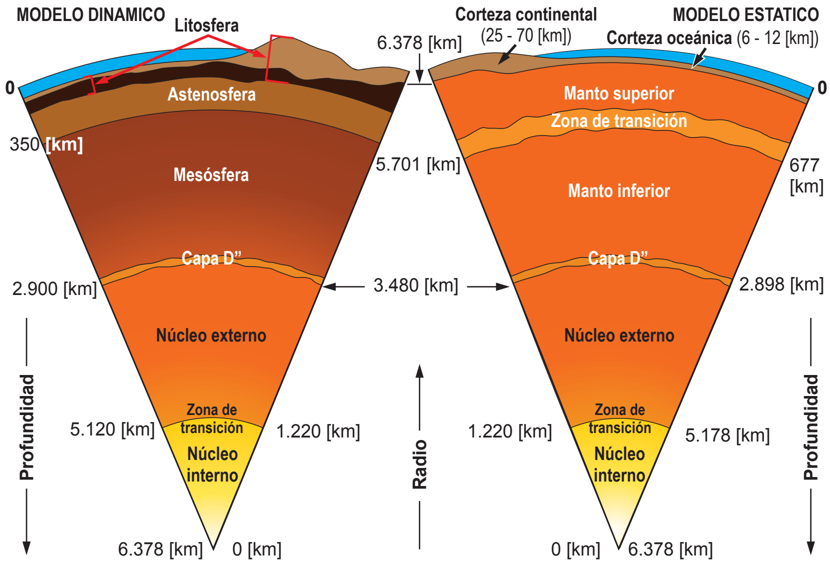


Figura 5.7: Modelos de la estructura interna de la Tierra.

- Composición química: corteza externa de silicatos solidificados, un manto superior e inferior, y un núcleo con otras dos capas, una externa semisólida, mucho menos viscosa que el manto y una interna sólida más una zona de transición entre el manto superior e inferior.

La capa más externa es la *corteza* terrestre, que posee un 0,473 % de la masa terrestre y sólo aproximadamente 35 [km] de grosor bajo los continentes y aproximadamente 5 [km] de grosor bajo los océanos. La corteza es la parte más externa de las capas internas (la superficie) de la Tierra, y la mayor parte (tanto oceánica como continental) se ha formado a partir de la actividad volcánica.

El 71 % de la superficie terrestre está cubierta por agua, principalmente líquida (97 % de ella es agua de mar y 3 % agua dulce). Esta característica es única en el sistema solar, aunque Europa (el satélite de Júpiter) posee océanos congelados en su superficie y Titán posee lagos de hidrocarburos. Esta capa de agua que cubre parte de la corteza terrestre se denomina *hidrósfera*. La hidrósfera posee una masa total de aproximadamente 0,0234 % de la masa terrestre y permite dividir la superficie terrestre en cinco océanos y cinco continentes.

Entre el manto superior y la corteza, las ondas P y S aumentan bruscamente su velocidad, esta zona de transición es denominada la *discontinuidad de Mohorovičić*. Constituye la superficie de separación entre los materiales rocosos menos densos de la corteza, formada fundamentalmente por silicatos de aluminio, calcio, sodio y potasio, y los materiales rocosos más densos del manto, constituido por silicatos de hierro y magnesio. Se encuentra a una profundidad media de unos 35 [km], aunque puede encontrarse a 70 [km] de profundidad bajo los continentes o a tan solo 10 [km] bajo los océanos.

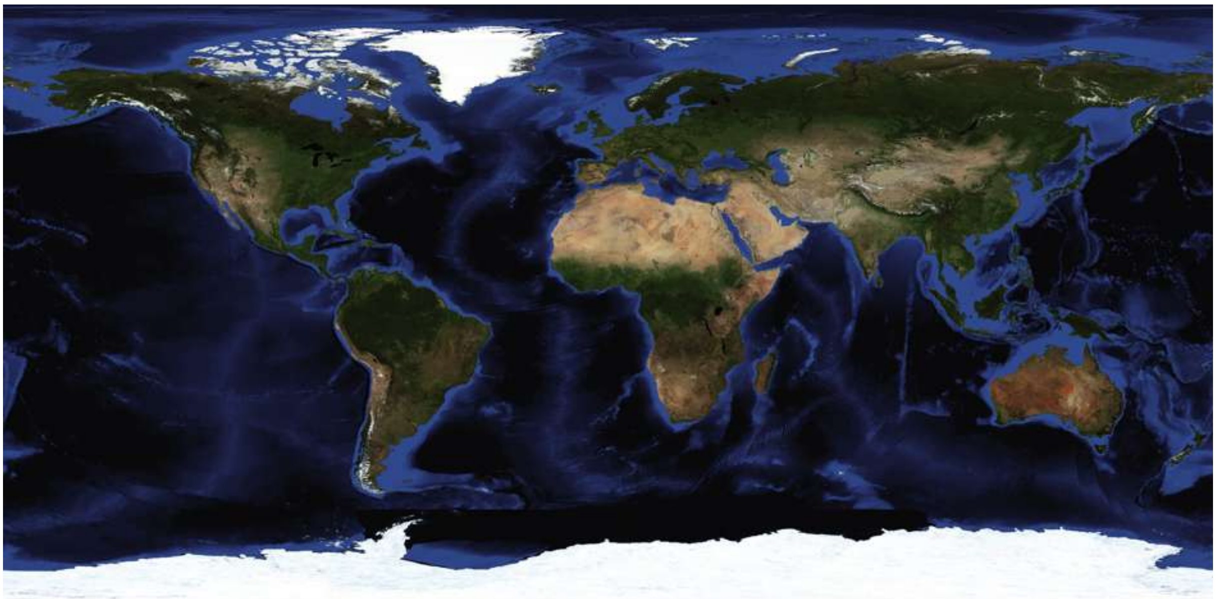


Figura 5.8: Planisferio terrestre realizado con la composición de imágenes satelitales. Créditos: Reto Stockli, NASA Earth Observatory.

El *manto superior* posee un 10,3 % de la masa terrestre y se extiende en algunas zonas a partir de los $\sim$ 10 [km] y hasta los $\sim$ 400 [km] de profundidad. Dada la poca profundidad del manto en algunas regiones, a veces, algunos de los fragmentos solidificados de éste han podido ser observados por la erosión de cordilleras montañosas y erupciones volcánicas. Los principales minerales que se han encontrado de esta forma son el olivino $(Mg,Fe)_2SiO_4$ y el piroxeno $(Mg,Fe)SiO_3$.

Bajo el manto superior existe una *zona de transición* (manto medio), que posee un 7,5 % de la masa terrestre, se extiende entre los $\sim$ 400 y $\sim$ 677 [km] bajo la superficie terrestre. Está compuesta de calcio, aluminio y granate, que es un silicato complejo con aluminio. Dependiendo de su temperatura es más o menos viscosa. Aunque en general el manto es sólido, en ciertos sectores la roca está fundida, la que recibe el nombre de *magma*.

El *manto inferior* posee un 49,2 % de la masa terrestre, se extiende entre los $\sim$3.670 [km] y los $\sim$5.701 [km] del centro. Está compuesta principalmente por silicio, magnesio y oxígeno, y en menor cantidad por hierro, calcio y aluminio.

La *capa D"* posee un 3 % de la masa de la Tierra y se extiende, en promedio, entre los $\sim$3.480 [km] y los $\sim$3.670 [km] del centro. Aunque habitualmente se le identifica como parte del manto inferior, el estudio de las ondas sísmicas sugiere que esta región sería una capa de composición química distinta de ésta.

En 1914 el sismólogo alemán *Beno Gutenberg* (1889 - 1960) observó que las ondas P desaparecen en una región que comprende unos 105 grados del epicentro y reaparecen alrededor de 140 grados, pero con un retardo de unos 2 minutos de acuerdo a la distancia recorrida. Esta "zona de sombra" de las ondas P, permitió a Gutenberg concluir que bajo el manto (en realidad bajo la capa D") había un núcleo de características físicas y composición química distinta del manto. En esta región, situada a unos 3.478 [km] del centro, se ha evidenciado la disminución de la rapidez de las ondas P de 13 a 8 [km/h] y que las ondas S no atraviesan, por lo que al menos una parte de esa región es líquida. La zona de transición, es denominada *discontinuidad de Gutenberg*.

En 1936 la sismóloga danesa *Ingue Lehmann* (1888 - 1993) evidenció que el núcleo debía tener dos regiones diferenciadas, debido a que las ondas P que atraviesan la región

más interna del núcleo tienen velocidades medias apreciablemente mayores que las que sólo atraviesan la región exterior, por lo que la región más interna es sólida.

El *núcleo externo* posee un 30,8 % de la masa terrestre y se extiende hasta los 3.480 [km], con una densidad que desciende gradualmente hasta su superficie externa hasta ser aproximadamente 1,6 veces la de la corteza terrestre. El núcleo externo está dividido del interno por la *discontinuidad de Lehmann*.

La evidencia sismológica sugiere que el núcleo externo está compuesto por metales calientes en estado líquido, además conductores de la electricidad. Allí se producirían corrientes convectivas que combinadas con el movimiento de rotación terrestre, mantiene un sistema de corrientes eléctricas que genera, al igual que un dínamo, un intenso campo magnético, el *campo magnético terrestre*.

El *núcleo interno* posee un 1,7 % de la masa terrestre y un radio de 1.220 [km] ($\sim$ 20 % del radio terrestre), su densidad es de $\sim$ 4,6 veces la de la corteza terrestre. Tiene temperaturas cercanas a 5.000 °C y debido a las condiciones de presión resulta ser sólido. Está compuesto por metales y gira entre 0,3 y 0,5 grados por año más que la corteza. En 900 años, el núcleo avanza un giro completo con respecto al resto del planeta.

El núcleo interno no es tan denso como para estar compuesto sólo de metales, y aunque no se conoce su composición química, se estima, debido a la abundancia y la facilidad con que se disuelven en el hierro fundido, que aproximadamente un 10 % de su masa estaría compuesta por oxígeno y/o azufre.

5.1.4.3. La tectónica de placas

La *litosfera* o *litósfera* (del griego $\lambda\acute{\iota}\theta o\varsigma$; piedra, y $\sigma\varphi\alpha\acute{\iota}\rho\alpha$; esfera) es la envoltura rocosa que constituye la corteza y el manto superior, sobre ésta se encuentran los continentes, mide unos 70 [km] de espesor bajo los océanos y alrededor de 115 [km] bajo los continentes.

Inmediatamente debajo de la litósfera está la *astenosfera* o *astenósfera*. Se encuentra ubicada en el manto terrestre aproximadamente entre 100 y 240 [km] por debajo de la superficie de la Tierra. En la astenósfera existen lentos movimientos de convección. La corteza puede ser muy delgada bajo los océanos, y las corrientes convectivas pueden producir fracturas en estas zonas, dando lugar a la formación de fisuras de miles de kilómetros de longitud en la que se produce un intenso vulcanismo dando origen a cordilleras submarinas denominadas "*dorsales oceánicas*". Las dorsales oceánicas cubren el fondo del océano con basalto y se encuentran en todos los océanos y su longitud total es del orden de 60.000 [km].

Las islas de origen volcánico, como las islas Canarias, Galápagos y la isla de Pascua, nacen por acumulación de pilas de basalto[9] en "puntos calientes" entre placas oceánicas, aunque este mismo proceso, a diferencia de las dorsales, pueden ocurrir también entre placas continentales.

A medida que la nueva litósfera se forma, gradualmente se enfría, contrae y se separa de la dorsal, viajando sobre el fondo del océano. Este proceso recibe el nombre de *formación del fondo oceánico*, separando las dorsales situadas en mitad del océano, lo que produce que los continentes se muevan desde las zonas calientes del manto hacia las zonas más frías con velocidades del orden de 5 a 10 centímetros al año, proceso que recibe el nombre de *deriva continental*.

[9]El basalto es una roca volcánica de color oscuro, rica en silicatos de magnesio y hierro y bajo contenido en sílice, que constituye una de las rocas más abundantes en la corteza terrestre.

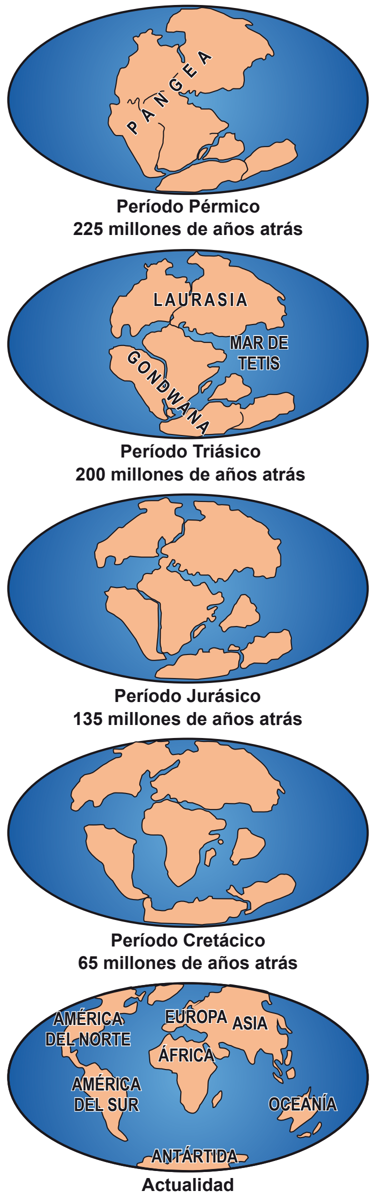


Figura 5.9: División de Pangea en bloques continentales hasta conformar los actuales continentes.

La teoría de deriva continental fue fue propuesta en 1912 por el geofísico y meteorólogo[10] *Alfred Wegener* (1880 - 1930), basándose principalmente en la forma en que parecen encajar los continentes en el océano atlántico, en particular, África y Sudamérica y en la similitud de los fósiles encontrados en las costas atlánticas de estos mismos continentes. Pese a que el mecanismo propuesto por Wegener para la deriva continental no tuvo mucho éxito, la teoría de la deriva continental sí, por lo que aceptándola, ésta nos dice que los continentes actuales estuvieron unidos en el pasado en un supercontinente que Wegener denominó *Pangea* (del griego $\pi\alpha\nu$, todo y *Gea*; toda la Tierra). El supercontinente Pangea se subdividió en dos supercontinentes: *Laurasia* al norte y *Gondwana* al sur. Posteriormente Laurasia se dividió en las actuales América del Norte y Eurasia (sin incluir a India), y Gondwana se dividió en las actuales África, América del Sur, Australia, Antártida e India (figura 5.9).

La litósfera está dividida en ocho grandes placas: Africana, Antártica, Euroasiática, Indo-australiana, Nazca, Norteamericana, Pacífica y Sudamericana y otro par de docenas de placas más pequeñas, entre ellas, Anatolia, Arábiga, Caribeña, Cocos, Filipina y Somalí (figura 5.10).

Producto de la deriva continental, las placas continentales chocan. Cuando una placa continental colisiona convergentemente con una placa oceánica, la densa placa oceánica tiende a deslizarse bajo la menos densa placa continental, produciendo una zona de *subducción*. Si las placas que colisionan convergentemente son ambas continentales, se incrustan una en otra, produciendo una zona de *obducción*. El sistema de los Himalayas es formado por obducción producto de la colisión de la placa India y la placa de Eurasia.

Producto de la subducción, se producen grandes depresiones en el suelo submarino denominadas *fosas oceánicas*, un ejemplo de esto es el de la *fosa peruano-chilena* que se forma producto de la subducción de la placa de Nazca bajo placa continental sudamericana. Por otra parte, producto de las fuerzas compresivas asociadas a este margen convergente, la corteza continental se levanta y repliega hasta formar cadenas montañosas costeras. La sudamericana *cordillera de los Andes* es el resultado de que el fondo del Océano Pacífico se ha deslizado bajo la placa continental.

La rocas basálticas de la corteza oceánica alcanzan condiciones de presión y temperatura al ir profundizándose con la subducción que les permite liberar el agua que portan, y con esto bajar el punto de fusión de las rocas del manto superior continental, generando magmas que ascenderán por diferencia de densidades, produciendo cámaras magmáticas que eventualmente podrán generar actividad volcánica, lo cual puede provocar *actividad*

[10] En realidad Wegener se doctoró en astronomía, pero es más conocido como geofísico y meteorólogo, ya que fue en estas áreas donde realmente se desempeñó.

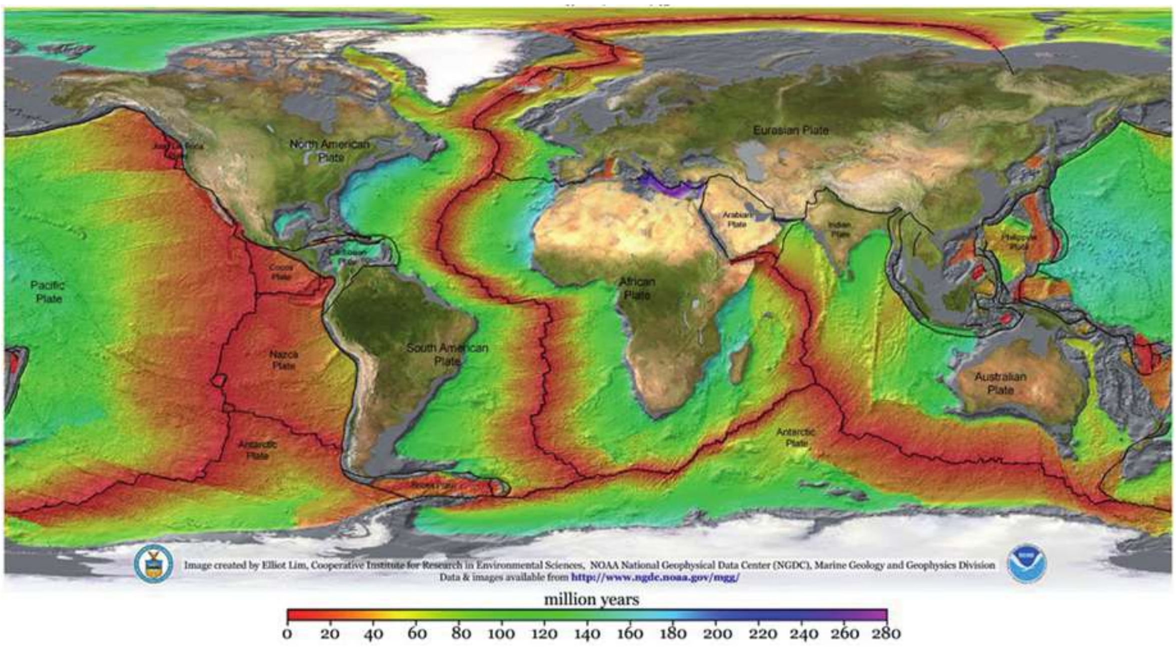


Figura 5.10: La figura muestra los límites entre las placas tectónicas, con las asociadas regiones de actividad volcánica y telúrica. Los colores indican edades de la corteza del fondo oceánico. Créditos: Elliot Lim, CIRES & NOAA/NGDC.

sísmica de origen magmático.

Las placas que se deslizan unas sobre otras en las zonas de subducción, a veces se traban entre si acumulando, al igual que un resorte comprimido, energía. En estas regiones las placas dejan de deslizarse al ritmo que lo harían de no trabarse, produciendo el levantamiento de la placa continental. Cuando ha acumulado la suficiente energía las placas se deslizan violentamente dando origen a *actividad sísmica de origen tectónico*. Si el hipocentro se encuentra en el fondo oceánico a la profundidad adecuada y el sismo ha sido de una magnitud considerable, la perturbación produce ondas que se propagan por el océano y que al llegar a las costas producen grandes olas que se desbordan, adentrándose a tierra, este fenómeno es el denominado como *maremoto tectónico* (del latín *mare*, mar y *motus*, movimiento) o a veces también llamado *tsunami* (del japonés ola de puerto), aunque este nombre incluye otro tipo de olas cuyo origen es distinto al del maremoto tectónico.

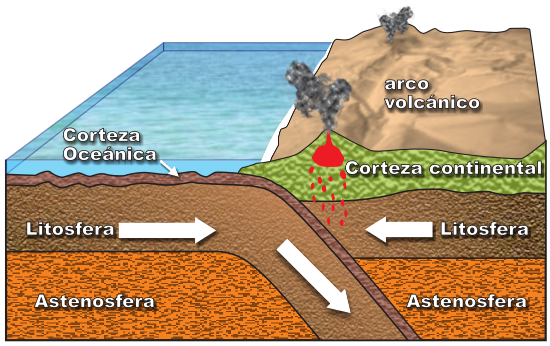


Figura 5.11: La zona de subducción de la placa de Nazca bajo la placa continental. Este proceso es el responsable de gran parte de la actividad sísmica de Chile, la denominada *actividad sísmica de origen tectónico*.

Vale la pena hacer mención del cataclismo ocurrido en el sur de Chile el 21 y 22 mayo de 1960, en el que se registran una serie de terremotos en Concepción y Valdivia uno de ellos el mayor registrado hasta la fecha (9,5 en escala Richter), que provocaron una serie de maremotos que arrasaron las costas del pacífico, alcanzando incluso Hawai y Japón; y que provocaran que dos días más tarde entrara en erupción el volcán *Cordón Caulle*. Además se modificó marcadamente la geografía de la zona: el terreno de la región se hundió con respecto de su nivel anterior al terremoto, los ríos cambiaron su curso, nacieron nuevos



Figura 5.12: Una de las olas del maremoto de 1960 en Onagawa, Japón. Créditos: USGS.

lagos incluso algunas montañas se movieron.

5.1.4.4. La atmósfera terrestre

Estructura y composición

La *atmosfera* o *atmósfera* (del griego $\dot{\alpha}\tau\mu\acute{o}\varsigma$; vapor, aire, y $\sigma\varphi\alpha\acute{\iota}\rho\alpha$; esfera) es la capa gaseosa que rodea a un cuerpo celeste. La atmósfera terrestre está compuesta por un 78,1 % de nitrógeno, un 20,94 % de oxígeno, un 0,93 % de argón, un $\sim$ 0,035 % de dióxido de carbono, una cantidad variable de vapor de agua, un 0,00182 % de neón, un 0,000524 % de helio, un 0,000114 % de criptón, un 0, 00005 % hidrógeno y un 0,00116 % de ozono.

Suele ser dividida en capas cuyo grosor es variable, dependiendo si es día o noche y de la estación del año. Estas capas son:

- *Tropósfera:* 0 - 8/16 [km]
- *Estratósfera:* 8/16 - 50 [km]
- *Mesósfera:* 50 - 80/85 [km]
- *Termósfera:* 80/85 - 500 [km]
- *Exósfera:* 500 - 1500/2000 [km]

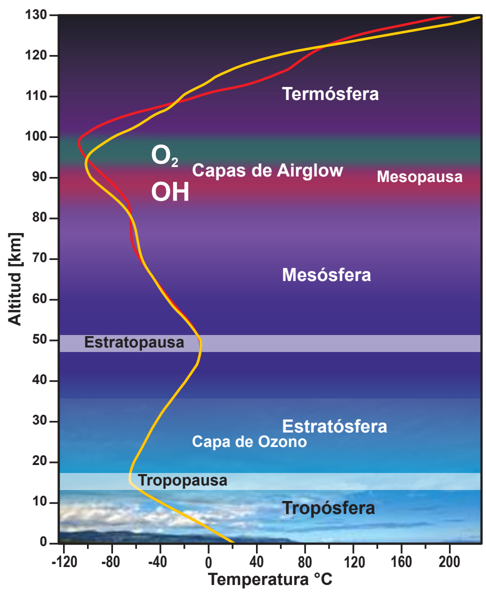


Figura 5.13: Estructura de la atmósfera terrestre. Las curvas representan la temperatura versus la altura. Los dos perfiles de temperatura señalan típicos cambios luego de algunas horas. Figura basada en el esquema de IAFE.

Las divisiones entre una capa y otra se denominan respectivamente *tropopausa*, *estratopausa*, *mesopausa* y *termopausa* o *ionopausa*. La alta atmósfera es la región atmosférica que se encuentra por encima de la mesopausa.

La *tropósfera* es la zona más baja de la atmósfera. Allí los gases son calentados en la superficie, ascendiendo por convección. El gas calentado se expande adiabáticamente[11] a medida que asciende, enfriándose. De esta forma la temperatura decrece uniformemente a razón de 1 °C cada 180 metros, hasta llegar a cerca de -56 °C en el límite superior.

En ella se producen todos los fenómenos meteorológicos, como la formación de las nubes, la lluvia y el viento. Además contiene la mayor proporción de vapor de agua, lo que permite mantener el calor procedente de la superficie.

Desde la *tropopausa* se encuentra una capa de ozono (O_3). Los fotones ultravioletas provenientes del Sol tienen la energía justa para romper el enlace simple entre los oxígenos de la molécula de ozono, de esta forma actúa como filtro de rayos ultravioletas provenientes del Sol. La capa de ozono resulta una fuente térmica, produciendo un aumento casi uniforme de la temperatura con la altura hasta unos pocos grados bajo cero. Debido a este gradiente negativo de temperatura, no ocurre la convección ascendente y los gases se estratifican de acuerdo a su peso atómico o molecular. Por ello, a esta zona se le denomina *estratósfera*.

Por encima de la capa de ozono, la ausencia de una fuente térmica hace que el aumento de temperatura con la altura se reduzca. Sobre los 50 [km], la temperatura comienza a decrecer, en la denominada *estratopausa*.

Sobre la estratopausa se encuentra la *mesósfera*. Allí la temperatura decrece por la expansión adiabática y por el enfriamiento debido al escape de radiación infrarroja emitida por moléculas con momento dipolar[12] como el dióxido de carbono, esta rápida disminución de temperatura es la principal característica de esta zona. La temperatura disminuye con la altitud hasta llegar a unos -70 o -90 °C. En esta zona, los gases también se separan en estratos de acuerdo a su peso molecular. La composición química del aire tiene entonces una fuerte dependencia con la altitud, y empieza a enriquecerse con gases más ligeros.

La radiación solar convierte el oxígeno molecular (O_2) en atómico (O) (fotodisociación), haciéndose cada vez más abundante el oxígeno atómico a medida que se asciende. La fotodisociación desaparece durante la noche.

Las nubes denominadas noctilúcidas, se encuentran en esta capa. Ellas son delgados estratos nubosos, compuestos probablemente de cristales de hielo y polvo: que son visibles durante el verano al crepúsculo como nubes sutiles y brillantes intensamente iluminadas por los últimos rayos del Sol. La observación de estas nubes muestra que en la alta mesósfera existe un complejo sistema de corrientes aéreas variables, que pueden alcanzar velocidades de 300 [km/h].

La temperatura disminuye a su valor mínimo en la *mesopausa*. Su altura varía con la época del año, encontrándose cerca de 85 [km] en verano, y de 100 [km] en invierno. No se tiene un modelo que explique a cabalidad cuales son los efectos dinámicos que producen esta variación.

Sobre la mesopausa se encuentra la *termósfera*. Allí los átomos están ionizados a elevadas temperaturas debido a la radiación solar de menor longitud de onda (rayos gamma y

[11]Una expansión adiabática es aquella que ocurre sin que haya intercambio de calor.

[12]El momento dipolar es una magnitud física cuya magnitud está determinada por el producto de la diferencia de cargas en una molécula por la distancia entre ambos centros (longitud del enlace), y es la expresión de la asimetría de la carga eléctrica en un enlace molecular.

rayos X) que son altamente energéticos, por ello también se denomina *ionósfera*. Dada la baja densidad de la termósfera y su baja conductividad térmica, su temperatura aumenta, debido a la radiación solar, desde los -70 °C hasta llegar a temperaturas cercanas a los 1.000 °C, y si el Sol está en período de actividad, las temperaturas pueden llegar a 1.500 °C. Es importante considerar que debido a la baja densidad, la sensación térmica sería muchísimo menor (recuerde que la temperatura es una medida de la agitación media de las partículas), por sobre los 60 [km] ya no es posible medir directamente la temperatura por contacto con un sensor físico (o biológico), pues requeriría tiempos muy grandes para alcanzar el equilibrio térmico.

Los tiempos de recombinación de los electrones con los iones, son superiores al período día-noche por lo que la ionosfera retiene gran parte de sus propiedades incluso en las regiones no iluminadas del planeta. Debido a esto, el plasma de la ionosfera es utilizado para reflejar las ondas de radio y televisión.

En esta capa se producen las auroras y se desintegran los *bólidos* (del griego $\beta o\lambda \acute{\iota}\varsigma$; arma arrojadiza, tiro), dando lugar a *meteoros* (del griego $\mu\varepsilon\tau\acute{\varepsilon}\omega\rho o\varsigma$; elevado en el aire) o *estrellas fugaces*.

Dependiendo del grado de ionización de cada nivel de altura pueden encontrarse máximos de ionización en capas denominadas “D”, “E”, “F1”, y “F2”. La *capa D* existe solo durante el día a unos 60 [km], es decir, en la mesósfera. La *capa E* o *estrato de Heaviside* se extiende entre 80 y 100 [km]. Las *capas F1* y *F2* o *capas de Appleton* se extienden entre los 200 y 300 [km], es decir, la alta termósfera.

La *exósfera* es la capa más externa de la atmósfera. Está compuesta principalmente por hidrógeno y helio. Aquí el número de átomos va disminuyendo hasta prácticamente desaparecer, muchos de ellos escapando al espacio interplanetario. Su temperatura se mantiene constante desde la termósfera debido a la falta de un mecanismo de enfriamiento eficiente.

Dinámica

La circulación atmosférica es producida por la desigualdad de la irradiación solar entre las distintas latitudes. Las bajas latitudes reciben una mayor irradiación neta, desarrollándose vientos, denominados *Alisios*, provenientes del noreste y del sureste como consecuencia del *efecto Coriolis*[13]. El encuentro de estos vientos cerca al ecuador obliga al aire cálido ecuatorial a elevarse, estableciéndose una circulación a escala global, denominada *célula de Hadley*. Desde las zonas ecuatoriales, donde el aire asciende se desplaza hasta latitudes medias de unos 30° en ambos hemisferios, allí desciende en los cinturones de altas presiones subtropicales. El efecto de la rotación te-

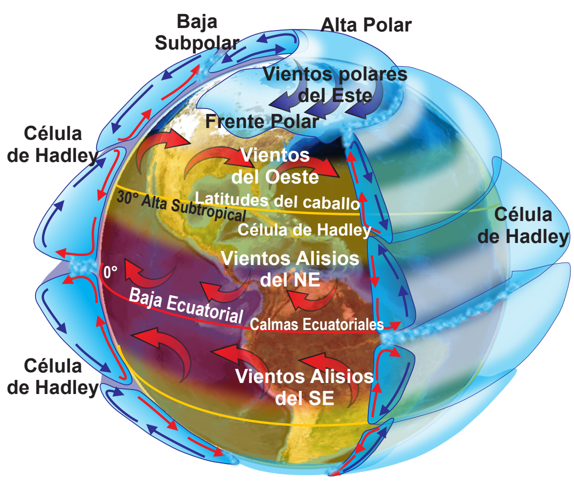


Figura 5.14: Esquema de la circulación general de la atmósfera. Adaptación de figura original de la NASA.

[13]El efecto Coriolis corresponde a una desviación en las trayectorias de los cuerpos en movimiento en dirección opuesta al sentido de giro de la Tierra, y la magnitud de la desviación depende de la velocidad del objeto y de su latitud. El efecto Coriolis es generado por la rotación terrestre en torno a su propio eje.

rrestre impide, debido a la fuerza de Coriolis, que las dos células de Hadley se extiendan por ambos hemisferios desde el Ecuador a los Polos.

Existe una segunda célula convectiva a latitudes mayores superpuesta a estos movimientos y denominada *célula de Ferrel*. La célula de Ferrell transporta el aire cálido de los trópicos hasta latitudes subpolares (60°). Posteriormente existe también una *célula polar* entre los 60° y los polos.

Formación de nubes

Las nubes se forman por la condensación de agua presente en el aire durante el enfriamiento de éste, generalmente por la ascención del aire caliente. El aire caliente sube, y se expande a medida que encuentra presiones más bajas a mayores alturas. Cuando el aire se expande a causa de una baja de presión, también se enfría. El aire que está subiendo se enfría por debajo de su punto de saturación, y el vapor de agua comienza a condensarse en forma de gotitas de agua. A medida que la burbuja de aire sube más y más, ésta continúa expandiéndose y enfriándose, y más humedad se condensa fuera de ella. El aire ascendente se enfría alcanzando el equilibrio con el aire circundante. Cuando se alcanza la *temperatura de equilibrio*, la burbuja de aire deja de subir y en el proceso se ha condensado bastante humedad, por lo que se forma una nube.

Generalmente, el vapor de agua condensa en la superficie de alguna partícula (*nucleación*). En la atmósfera hay millones de partículas microscópicas que flotan y que pueden proporcionar la superficie necesaria para la condensación del agua. Estas partículas denominadas *núcleos de condensación* de la nube (CCN, por su acrónimo en Inglés), o aerosoles, son unas 100 veces más finas que un cabello humano. Los CCN provienen de procesos naturales y de actividades humanas, e incluyen polvo, ceniza volcánica, sal marina, y contaminación.

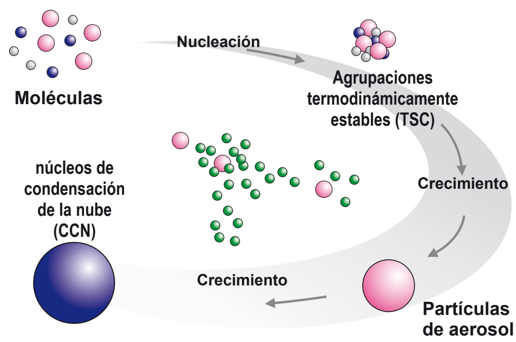


Figura 5.15: Formación y crecimiento de los CCN. Adaptación de figura original de Miikka Dal Maso & Lauri Laakso.

Eventualmente, bastante vapor de agua se condensará sobre estos núcleos de condensación y formarán una nube. El número de partículas disponibles en la atmósfera determina el número de partículas de nubes que pueden formar. Si hay un número elevado de CCN en la atmósfera, entonces se puede formar el mismo número de gotitas de nubes. A mayor cantidad de CCN en un área determinada, las gotitas de nubes son más pequeñas, debido a que el agua líquida disponible se distribuye sobre más gotitas de nube.

La ascención del aire se produce principalmente por:

- *Calentamiento de la superficie:* El Sol calienta la superficie de la Tierra, que a su vez calienta el aire que sube, y se enfría. Los tipos de nubes que se forman de este proceso de calentamiento de la superficie son: cúmulonimbos, cúmulos, mammatus, y estratocúmulos.

- *Montañas:* Cuando el aire se encuentra con una montaña, cordillera de montañas u otro tipo de terreno similar, el aire subirá y se enfriará. Los tipos de nubes que se forman a causa de encuentros con montañas son nubes estrato y nubes lenticulares. Otra forma es que el aire suba porque la montaña está más caliente que el aire

circundante. Los tipos de nubes que se forman en este caso son: cúmulonimbos, cúmulo y mammatus.

- *Masas de aire que convergen:* En un sistema de baja presión el gradiente de presión hace que el viento se mueva hacia el centro desde todas direcciones. Cuando este aire llega al centro, la única posibilidad que le queda es subir. Los siguientes tipos de nubes se pueden producir ante la convergencia del aire de la superficie: nubes altocúmulo, altostrato, cirrocúmulo, estratocúmulo, o estrato.

- *Frentes de estados del tiempo:* Los frentes ocurren cuando dos diferentes masas grandes de aire con diferente densidad chocan sobre la superficie de la Tierra. Cada masa de aire tiene sus propias características como temperatura y humedad.

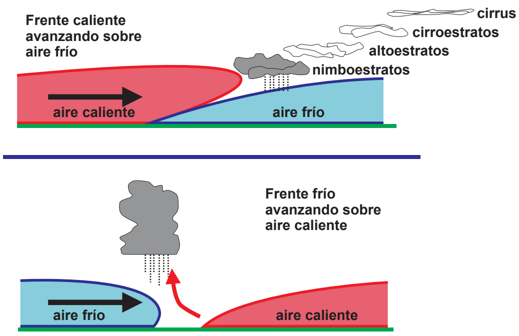


Figura 5.16: El aire frío, más denso que el aire caliente, queda debajo del aire caliente. Una vez que el aire caliente sube, se enfría y se pueden formar nubes. Créditos: Center for Multiscale Modeling of Atmospheric Processes (CMMAP).

Los frentes cálidos producen nubes cuando el aire caliente sustituye al aire frío deslizándose sobre él. Gran cantidad de diferentes tipos de nubes son producidos de esta manera: altocúmulos, altoestratos, cirrocúmulos, cirroestratos, cirrus, cúmulonimbos, mammatus, nimboestratos, estratos, y estratocúmulos.

Los frentes fríos ocurren cuando el pesado aire frío desplaza al más ligero aire caliente, y lo empuja hacia arriba. Las nubes cúmulos son los tipos más comunes de nubes producidas por frentes fríos. Generalmente crecen en forma de nubes cúmulonimbos, las cuales producen tempestades. Los frentes fríos también pueden producir nubes nimbostratos, estratocúmulos, y estratos.

5.1.4.5. Campo magnético terrestre

La *magnetósfera* es la región exterior en la que el campo geomagnético ejerce una acción predominante sobre las partículas ionizadas. Se extiende a partir de la ionósfera, aunque se encuentra principalmente en la exósfera. El campo magnético terrestre desvía la mayor parte del viento solar formando un escudo protector contra las partículas cargadas de alta energía procedentes del Sol.

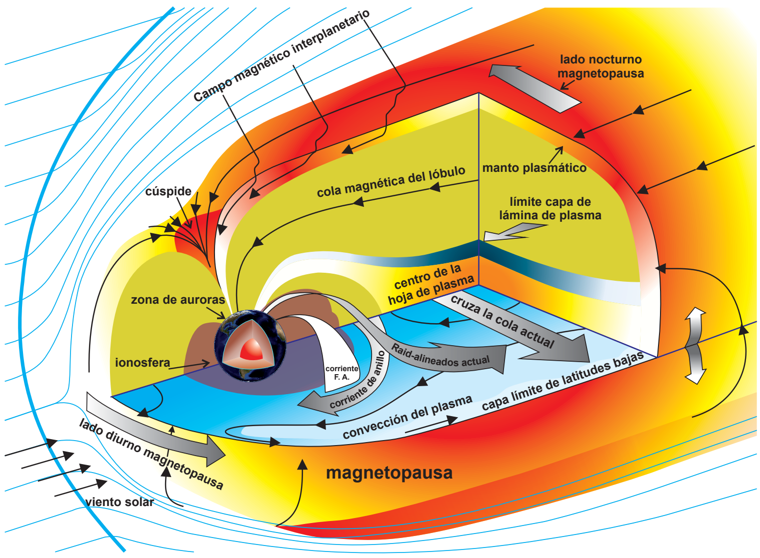


Figura 5.17: Estructura de la magnetósfera terrestre. Adaptada con el permiso de Annual Review of Astronomy and Astrophysics, Volume 20 © 1982 de Annual Reviews, http://www.annualreviews.org.

Los *cinturones de van Allen* son regiones de la magnetósfera terrestre que contienen partículas cargadas del viento solar atrapadas por el campo magnético terrestre. Los cinturones son

áreas toroidales en las que partículas cargadas se mueven en forma espiral cuyo eje son las *líneas de inducción* o *campo magnético terrestre* que van desde un polo magnético al otro.

Los cinturones son dos. El *cinturón interior* está a unos 1.000 [km] de la superficie de la Tierra y se extiende por sobre los 5.000 [km]. El *cinturón exterior* se extiende desde aproximadamente 15.000 [km] hasta los 20.000 [km].

La magnetósfera interacciona con el viento solar en una región denominada *magnetopausa* que se encuentra a unos 60.000 [km] de la Tierra en la dirección Tierra-Sol y a mucha mayor distancia en la dirección opuesta. Por delante de la magnetopausa se encuentra la superficie de choque entre el viento solar y el campo magnético. En esta región el plasma solar se frena rápidamente antes de ser desviado por el resto de la magnetósfera. Las partículas cargadas del viento solar son arrastradas por el campo magnético sobre los polos magnéticos dando lugar a la formación de auroras polares. En el lado no iluminado las líneas de campo se deforman y alargan arrastradas por el viento solar alcanzando un tamaño de 300.000 [km] en la dirección opuesta al Sol.

La Tierra es el único planeta rocoso que posee un campo magnético apreciable, posiblemente debido al pasado catastrófico que formó la Tierra y la Luna actuales, ya que esto permitió a la Tierra adquirir la cantidad de material necesario para poseer el gran núcleo metálico, que permite que una parte de él sea sólido y la otra líquida.

La fuente del campo serían las partículas cargadas en el núcleo exterior, que se mueven producto de la rotación y las corrientes convectivas. Las partículas cargadas en movimiento conforman corrientes eléctricas que inducen un campo magnético. Este modelo es conocido como la *teoría del dínamo*.

Los modelos magnetohidrodinámicos muestran que la intensidad del campo magnético crece y decrece, los polos se mueven, y ocasionalmente se alternan. Una inversión puede tardar unos pocos miles de años en completarse y durante ese intervalo de tiempo, el campo magnético no desaparece. Las líneas de inducción magnética sobre la superficie terrestre se retuercen y se enredan. Durante este período los polos magnéticos pueden aparecer imprevistamente en lugares distantes a los polos geográficos. Sin embargo, el campo magnético seguiría protegiendo al planeta de la radiación espacial y de las tormentas solares.

La dirección del *momento dipolar magnético* (el eje magnético) se encuentra inclinado unos 160° respecto del eje de rotación, de esta forma, los polos magnéticos no coinciden con los polos geográficos. El Polo Sur Magnético se encuentra a 560 [km] del Polo Norte Geográfico. Por ello, en realidad la brújula no apunta exactamente hacia el Norte geográfico, sino al Sur magnético. La diferencia entre ambos medida en grados, se denomina *declinación magnética*. Existen registros de que los polos magnéticos se están moviendo, por ejemplo el polo Sur magnetico se está desplazando por la zona norte de Canadá hacia el norte geográfico (figura 5.18). El polo magnético se movió durante el siglo XX en dirección norte a una velocidad de 10 [km/a], aumentando hacia fines de siglo hasta 40 [km/a]. La dirección del campo magnético queda registrada en la orientación de los "dominios magnéticos" de las rocas, así, es posible medir el ligero magnetismo. De acuerdo con esto, se evidencian numerosas inversiones de los polos magnéticos. Durante los últimos cinco millones de años se han efectuado más de veinte inversiones, la más reciente hace 780.000 años. Otras inversiones ocurrieron hace 870.000 y 950.000 años. El estudio de los sedimentos del fondo del océano indica que el campo estuvo prácticamente inactivo durante 10 o 20 mil años, hace poco más de un millón de años.

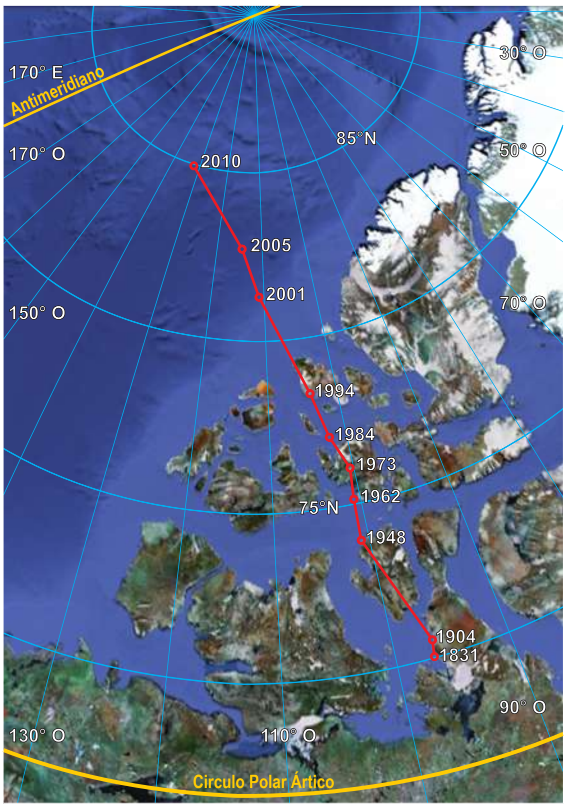


Figura 5.18: El movimiento del polo Sur Magnético de la Tierra a través del ártico canadiense desde 1831 hasta el 2010. Figura construida a partir de los datos de *Geological Survey of Canada* y Google Earth.

Dada la no periodicidad de las inversiones, no se sabe cuando se producirá la próxima, aunque se ha evidenciado una disminución de la intensidad en un 10 % desde el siglo XIX. La *variación secular* (nombre con el que se denomina a la variación de la intensidad del campo magnético), no implica que la inversión de los polos sea inminente, pues los registros paleomagnéticos muestran que la intensidad del campo magnético terrestre actual es mucho mayor que la media[14].

5.1.5. Planetas rocosos

Como hemos visto en la tabla 5.1 y en la figura 5.3, en el sistema solar existen al menos dos tipos de planetas, los pequeños y densos, denominados planetas rocosos y los grandes y poco densos denominados planetas gigantes. Los planetas rocosos del sistema solar coinciden con los planetas interiores: Mercurio, Venus, la Tierra y Marte.

Mercurio, el planeta más próximo al Sol y, exceptuando los planetas enanos, es el más pequeño del sistema solar. Su diámetro ecuatorial es de 4.879,4 [km].

Mercurio es el único planeta de la vecindad terrestre que prácticamente escapó al estudio telescópico, ya que tiene una elongación máxima de solo 27°, lo cual lo hace inobservable por cualquier telescopio profesional[15]. Por otra parte, la misma poca elongación hace inviable que sea observado por cualquier telescopio espacial debido a que se ponen en riesgo los costosos y sensibles instrumentos. Debido a lo anterior, hasta hace muy poco Mercurio era un mundo casi desconocido.

En 1965 se enviaron pulsos de radar hacia Mercurio evidenciándose que posee un período de rotación de 58,7 días, lo cual es 2/3 de su período de traslación, encontrándose en resonancia giro-orbital, y no, tal como se suponía, en rotación sincrónica (ver Volumen I, sección 3.2).

Venus es el segundo planeta más próximo al Sol, posee un diámetro ecuatorial de 12.103,6 [km], y debido a las similitudes de tamaño, masa y composición, es denominado el planeta gemelo de la Tierra.

Venus posee un lento movimiento de rotación sobre su propio eje, esto produce que el año en dicho planeta tenga solo 1,92 días venéreos. Además este movimiento de rotación es retrógado, es decir, de Este a Oeste.

Venus es el planeta que más puede acercarse a la Tierra, la última vez que esto sucedió fue el 16 de diciembre de 1850, alcanzando la distancia de 0,26 [UA] o 39.514.827 [km]. El

[14]La magnitud del momento dipolar magnético, es de $8 \cdot 10^{22}$ [A · m^2], el doble del valor medio del último millón de años.

[15]Los telescopios profesionales nunca se apuntan a menos de 30°, debido a que el grosor de la atmósfera aumenta con la distancia cenital. A 30° el grosor de la atmósfera es el doble que hacia el cenit.

año 2101 se volverá a aproximar a una distancia de 0,26 UA, pero esta vez a 39.541.578 [km].

Marte es el cuarto planeta más próximo al Sol, su diámetro ecuatorial es de 6.794,4 [km], esto es, un 54,8 % del terrestre. Es denominado el planeta rojo debido al color que lo caracteriza.

El movimiento de rotación de Marte sobre su propio eje dura 24 [h] 37 [min] 22,7 [s] y el de rotación alrededor del Sol (año marciano) dura 668,6 días terrestres.

Mercurio y Venus no poseen satélites naturales, la Tierra posee uno, la *Luna*; y Marte posee dos: *Fobos* y *Deimos*.

5.1.5.1. Atmósferas

La sonda *Mariner 10* evidenció la existencia de un intenso campo magnético en Mercurio. Este intenso campo magnético atrapa partículas cargadas del viento solar, formando una magnetósfera, lo que ha sido observado y corroborado por la sonda MESSENGER. La Mariner 10 descubrió la presencia de hidrógeno, helio y oxígeno, y la MESSENGER detectó también emisiones de radiación ultravioleta originados por la presencia de calcio, sodio e hidrógeno en la exósfera de Mercurio que se extiende a más de 40.000 [km]. Este material, proviene principalmente de la propia superficie del planeta expulsado por la radiación, por el viento solar y por la vaporización de meteoroides, luego estos átomos son acelerados por la presión de la radiación solar, formando una larga cola de átomos que fluye lejos del Sol. Debido a lo anterior, Mercurio posee una tenue atmósfera constituida principalmente por potasio y sodio, con trazas de otros elementos. La presión atmosférica debe ser de sólo una cien milésima parte de la presión atmosférica terrestre a nivel del mar. La tenue atmósfera no es capaz de evitar los grandes cambios de temperatura que pueden llegar a los 350 °C por el día y a −170 °C por la noche.

Venus posee una densa atmósfera, compuesta en 96 % dióxido de carbono (CO_2) y 3 % nitrógeno y trazas de otros elementos: 0,015 % (o 150 ppm) de dióxido de azufre (SO_2), 0,007 % (70 ppm) de argon (Ar), 0,002 % (20 ppm) vapor de agua, 0,0017 % (17 ppm) de monóxido de carbono, 0,0012 % (12 ppm) de helio, 0,0007 % (7 ppm) de neón.

Aunque las cantidades de dióxido de carbono y nitrógeno puedan parecer muy distintas de las de la atmósfera terrestre, son aproximadamente las mismas, solo que en la Tierra casi todo el CO_2 se encuentra en rocas de la corteza. La presión atmósferica en la superficie es de 9321,9 [kPa] equivalente a 93 [Bar] (1 [Atm] = 1 [Bar] = 10^5 [Pa]).

El CO_2 tiene un alto valor de calor específico, por ello provoca un importante efecto invernadero, la temperatura media superficial de Venus es de 422 °C alcanzando en las zonas ecuatoriales unos 458 °C, así su temperatura superficial es mayor que la de Mercurio, aunque se encuentre a más del doble de la distancia al Sol que éste y de recibir sólo el 25 % de su radiación solar. A diferencia de Mercurio la temperatura no varía de forma significativa entre el día y la noche, debido al transporte de calor que efectuan los fuertes vientos de su atmósfera. En ausencia del efecto invernadero, la temperatura en la superficie de Venus podría ser similar a la de la Tierra.

La atmósfera de Venus está compuesta por las siguientes capas:

- *Tropósfera:* 0 - 65 [km]
- *Estratósfera:* 65 - 95 [km]
- *Termósfera:* 95 - 250 [km]



Figura 5.19: Imagen de Venus tomada por la sonda Mariner 10 en ultravioleta, su superficie no es visible debido a una capa de nubes que cubre todo el planeta. Créditos: NASA/JPL/Mattias Malmer.

La densa capa de nubes que cubre al planeta, refleja al espacio la mayor parte de la radiación solar, además, la mayor parte de la radiación que atraviesa las nubes es absorbida por la atmósfera. Esto impide que la mayor parte de la radiación solar llegue a la superficie. En la atmósfera superior se reciben 2.613,9 $[W/m^2]$, sin embargo, solo el 40 % de esa cantidad llega a la superficie, por lo que ésta no se calienta ni se ilumina, como era de esperar, por la radiación solar que recibe.

Las sondas que han penetrado la atmósfera del planeta han identificado la presencia de tres distintos estratos de nubes: un estrato superior, que va entre los 65-70 [km] hasta los 55 [km] compuesto de pequeñas gotas de ácido sulfúrico, un estrato intermedio, constituido de gotas más grandes y menos numerosas, y entre los 52 a 50 [km] de altitud se encuentra el estrato inferior más denso y constituido por las gotas más grandes. Por debajo de tal nivel la temperatura es tan elevada como para vaporizar las gotas, generando una niebla o bruma que se extiende hasta unos 31 [km] de altitud. La parte más baja de la atmósfera es transparente y carente de formaciones nubosas.

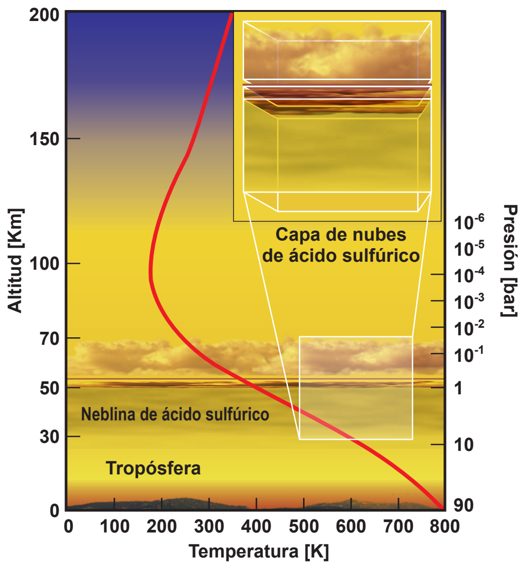


Figura 5.20: Estructura de la atmósfera de Venus. La curva representa la temperatura versus la altura.

La formación de estas nubes comienza con la reacción del azufre depositado en las rocas superficiales con el monoxido y el dióxido de carbono produciendo sulfuro de carbonilo (COS). En la troposfera, en la denominada *zona termoquímica*, el sulfuro de carbonilo reacciona con los gases oxigenados para producir dióxido de azufre (SO_2):

$$COS + O \longrightarrow CO + SO_2$$

Por la parte superior de las nubes, entre los 70 y 80 [km] en la llamada *zona fotoquímica* los fotones ultravioletas ($\lambda > 169$ [nm]) pueden disociar el dióxido de carbono, el oxígeno, altamente reactivo puede reaccionar con el el dióxido de azufre, formando trióxido de azufre, el que al reaccionar con el agua produce gotas de ácido sulfúrico:

$$CO_2 + h\nu \longrightarrow CO + O$$
$$SO_2 + O \rightarrow SO_3$$
$$SO_3 + H_2O \longrightarrow H_2SO_4$$

Estas gotas caen, penetrando en la denominada *zona de condensación*, creciendo, debido a la adhesión entre gotas, adquisición de vapor de SO_2 y agua. Cuando llegan a las zonas más bajas de la capa de nubes las gotas se vaporizan en la denominada *zona de*

evaporación o *de disociación térmica*, formando vapor de dióxido de azufre y agua:

$$H_2SO_4 \cdot nH_2O\ (particulas) \rightarrow SO_2 + H_2O + O$$

De esta forma vemos que a diferencia de las nubes terrestres, que se originan por el enfriamiento de aire ascendente y de la consiguiente condensación de vapor de agua, las nubes venerianas se forman producto de reacciones químicas que combinan el dióxido de azufre y el vapor de agua, gracias a la fotodisociación en la alta atmósfera y la termodisociación cerca de la superficie.

El viento en Venus varía según la altitud, en un grado mucho mayor que en la Tierra. En la atmósfera superior estos vientos pueden alcanzar los 350 [km/h], esto es, unas 60 veces más rápido que la velocidad de rotación del planeta, circunvalándolo en tan sólo 4 días. Debido a esto, a dicho fenómeno se denomina *superrotación*. La superrotación abarca todas las latitudes y todas las alturas, permitiendo una distribución eficiente del calor. Además, la baja velocidad de rotación planetaria y la ausencia de fuerzas de Coriolis permiten que las células de Hadley tengan carácter global, transportando el calor directamente desde el ecuador hasta los polos. El calor es transportado por corrientes convectivas incluso a latitudes medias del lado no iluminado del planeta.

La misión Venus Express ha determinado que las nubes de las tres capas se mueven a distintas velocidades. La capa superior, a 66 [km] de altitud, se desplaza a unos 370 [km/h], la capa intermedia, a 61 [km], se mueve a 220 [km/h] y la capa inferior, a 45-47 [km] de altitud, se mueve a 210 [km/h]. Hacia las latitudes superiores a los 65°, los vientos se modifican de manera dramática: en el hemisferio Sur todas las capas de nubes se unen en un solo movimiento formando un inmenso doble vórtice polar, y hacia sus vórtice, las velocidades se reducen casi a cero.

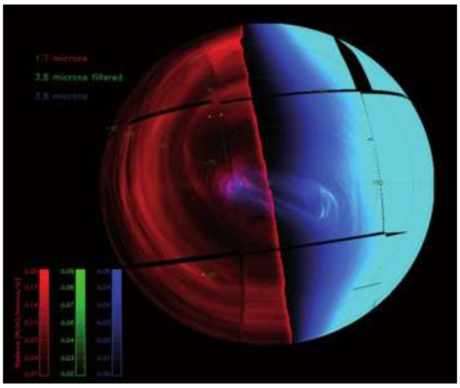


Figura 5.21: Doble vórtice polar del hemisferio Sur de Venus y la emisión de radiación infrarroja por moléculas de oxígeno formadas en el lado nocturno del planeta. Créditos: ESA.

La Venus Express ha observado en la ionosfera de Venus un tipo de ondas electromagnéticas polarizadas circularmente (ver Apéndice B) bastante particular, que son llamadas de "modo whistler". Estos se producirían por descargas eléctricas en la alta atmósfera asociadas a relámpagos, algo no esperado, dada la diferencia de sus nubes respecto de las terrestres.

Venus posee un campo magnético muy débil, esto podría ser consecuencia de la lenta rotación y/o la falta de convección en su núcleo. Este débil campo magnético sería inducido y podrían explicarse en su mayor parte por la interacción con el viento solar.

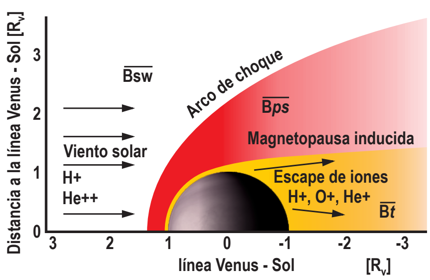


Figura 5.22: Interacción entre el viento solar y la atmósfera de Venus. Adaptada con el permiso de Macmillan Publishers Ltd: Nature 450 © 2007.

El origen de este campo, se puede entender como una envoltura de las líneas de campo alrededor de un obstáculo, que en este caso sería Venus. La magnetósfera inducida de Venus está compuesta de un arco de choque, una envoltura magnética, la magnetopausa y una cola magnética.

El punto más cercano del arco de choque se encuentra a 1.900 [km] por encima de la superficie de Venus, en momentos de mínima actividad solar, en momentos de máxima actividad solar esta distancia podría ser varias veces mayor.

La magnetopausa se encuentra a una altitud de 300 [km], unos 50 [km] sobre la ionopausa. Entre la magnetopausa y la ionopausa existe una barrera magnética que impide al plasma solar penetrar profundamente en la atmósfera del planeta, al menos durante los períodos de actividad solar baja.

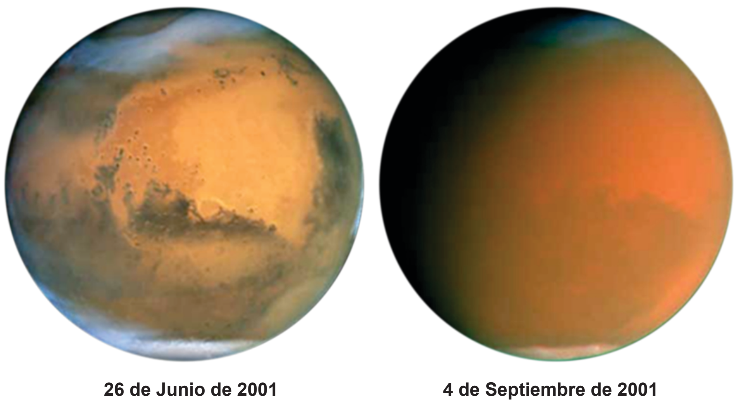
La cola magnética, que se extiende hasta unos diez radios del planeta, es la parte más activa de la magnetósfera de Venus, ocurriendo eventos de reconexión y aceleración de partículas.



Figura 5.23: Imagen de la atmósfera marciana tomada desde el espacio, se observa su color rojizo. Créditos: NASA.

Marte posee una tenue atmósfera, compuesta en 95,32 % de dióxido de carbono (CO_2), 2,7 % de nitrógeno (N_2), 1,6 % de argón (Ar), 0,13 % de oxígeno (O_2), 0,07 % monóxido de carbono (CO), 0,03 % de agua (H_2O) y trazas de otros gases. La presión atmósferica en la superficie es de sólo 7 a 9 [hPa][16], esto es, 0,007 a 0,009 [bar]. A estas presiones no es posible la existencia de agua líquida, por otra parte debido a la baja concentración de ozono (0,000003 %), la atmófera marciana no bloquea la radiación ultravioleta. El dióxido de carbono produce, como es de esperar, efecto invernadero aunque en este caso es leve, ya que solo aumenta la temperatura superficial unos 5 grados.

Aunque la atmósfera es transparente, en ciertas ocasiones se producen fuertes tormentas de polvo que en algunos casos pueden llegar a cubrir toda la superficie del planeta, incluso durante meses (figura 5.24). El color característico del cielo marciano, un suave color rosa-salmón, se debe a granos de polvo muy finos procedentes del suelo que dispersan la luz. El clima de Marte es fuertemente influenciado por las variaciones de polvo atmosférico, aunque esto no está completamente entendido aún.



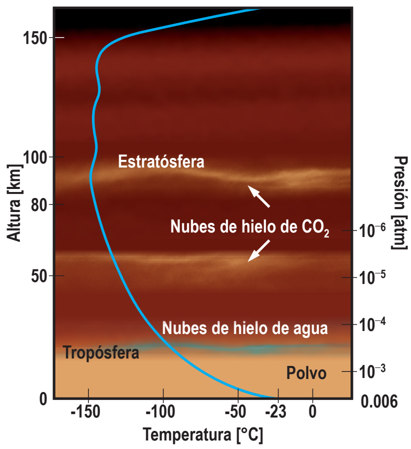


Figura 5.24: Izquierda: Imágenes del Telescopio Espacial Hubble que muestran al planeta Marte antes (izquierda) y durante (derecha) la gran tormenta de polvo del año 2001. Se observa la presencia de nubes. Créditos: NASA, J. Bell (Cornell), M. Wolff (SSI) & Hubble Heritage Team (STScl/AURA).

Figura 5.25: Derecha: Estructura de la atmósfera de Marte. La curva representa la temperatura versus la altura.

[16] 1 [hPa] = 10^2 [Pa]

A diferencia de la atmósfera terrestre que posee muchos componentes distintos (puros/mezclados, traza de gases orgánicos, azufre), procesos (nucleación homogénea[17]/heterogénea, congelación homogénea, congelación de contacto) y fases (líquidos, sólidos), variados tipos de nubes: convectivas (cúmulos, cúmulonimbos), radiativas (estratos, nieblas, estratocúmulos, etc.) y con condiciones iniciales diferentes para los distintos tipos de nubes (baja/alta troposfera, estratosfera, mesosfera), el sistema de nubes marcianas es más sencillo, ya que sólo posee nubes de hielo fino, el efecto radiativo es pequeño y sólo componentes puros condensan (H_2O y CO_2). Existe una gran cantidad de núcleos de condensación (polvo) por lo que la nucleación es heterogénea.

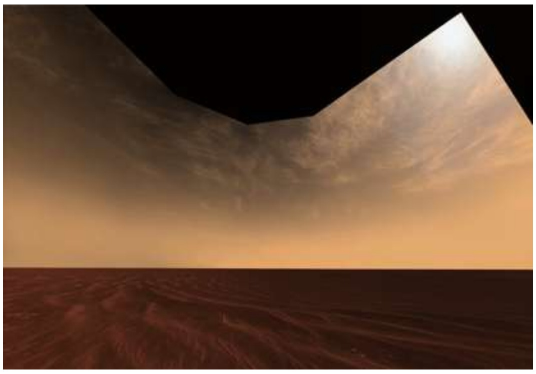


Figura 5.26: Tenues nubes de finísimos cristales de hielo tomadas por el Opportunity rover. Créditos: Mars Exploration Rover Mission, Cornell, JPL, NASA.

Aunque la atmósfera posee solo pequeñas trazas de agua, solo 0.016 % (la Tierra posee alrededor de 2 %), durante la noche (en las latitudes medias) el vapor de agua de la atmósfera condensa formando tenues nubes de finísimos cristales de hielo, estos cristales de hielo incluso precipitan sobre la superficie, sublimando por la mañana y ascendiendo hasta unos cuatro kilómetros de altura donde se forman nubes de nuevo. Estas nubes, se asemejan a los tenues cirrus terrestres.

Un tipo especial de nubes, debido a que la propia atmósfera está compuesta principalmente de dióxido de carbono, son las de cristales de nieve carbónica que se forman por la condensación de la propia atmósfera durante la noche polar.

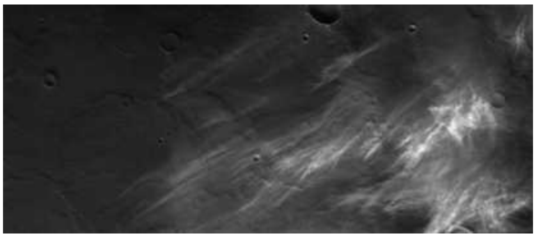


Figura 5.27: Nubes de CO_2 en al alta atmósfera (entre 80 y 100 [km]) son las nubes más altas por encima de cualquier superficie planetaria. Créditos: Mars Express, ESA.

Además, la *Mars Express* logró detectar una capa de nubes en la alta atmósfera, a una altitud de entre 80 y 100 kilómetros. Las nubes son de dióxido de carbono y son apenas visibles desde la superficie después de la puesta de Sol. Esto se debe a que las nubes son muy débiles y sólo se pueden ver cuando reflejan la luz del sol contra la oscuridad del cielo nocturno. En ese sentido, se ven similares a las nubes terrestres de la mesosfera, también conocido como las nubes noctilúcidas, las que se producen en la altura a 80 kilómetros de altitud, donde la densidad de la atmósfera es similar a la de Marte a 35 kilómetros, por lo que estas nubes son las más altas conocidas de todos los planetas, a una altura donde la atmósfera está más enrarecida. La condensación de estas nubes se produciría por nucleación producto de granos de polvo en la alta atmósfera, alrededor de los cuales se forman cristales de dióxido de carbono para formar nubes.

De esta forma el polvo, el agua y el dióxido de carbono forman un complejo sistema que cambia de fase y se intercambia entre la superficie y la atmósfera, por lo que se habla de "ciclos" de:

- El agua en fase no líquida (en la atmósfera, en los casquetes polares, en las nubes).
- El dióxido de carbono (en la atmósfera, en los casquetes polares, en las nubes).

[17]En la nucleación homogénea solo intervienen moléculas de H_2O (las gotas se forman por colisión de moléculas) mientras que en la nucleación heterogénea intervienen los CCN.

- El polvo (en la superficie y cantidades variables en suspensión en la atmósfera).

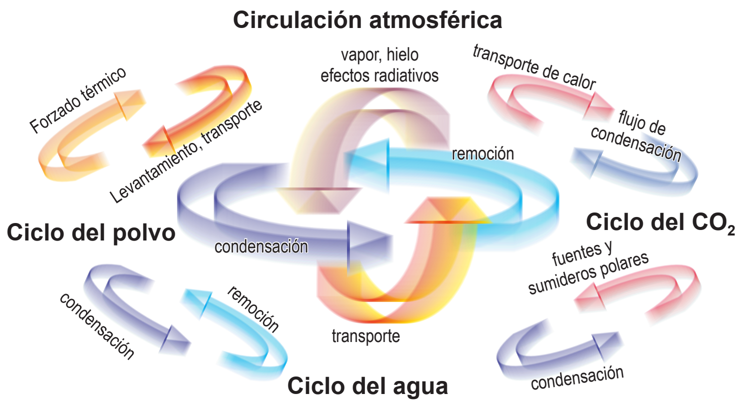


Figura 5.28: El complejo sistema atmosférico marciano. Adaptación de figura original de Francois Forget.

Por otra parte, la química de la atmósfera marciana, al igual que ocurre en la Tierra, está estrechamente ligada a las reacciones químicas ocurridas en las nubes. En la superficie de los cirrus terrestres ocurre la captura de los radicales hidrogenados HOx (OH y HO_2) en la superficie de los cristales de hielo. En la atmósfera terrestre, los cristales de hielo de las nubes pueden destruir y también desactivar los radicales hidrogenados HOx, los que deberían destruir el ozono marciano.

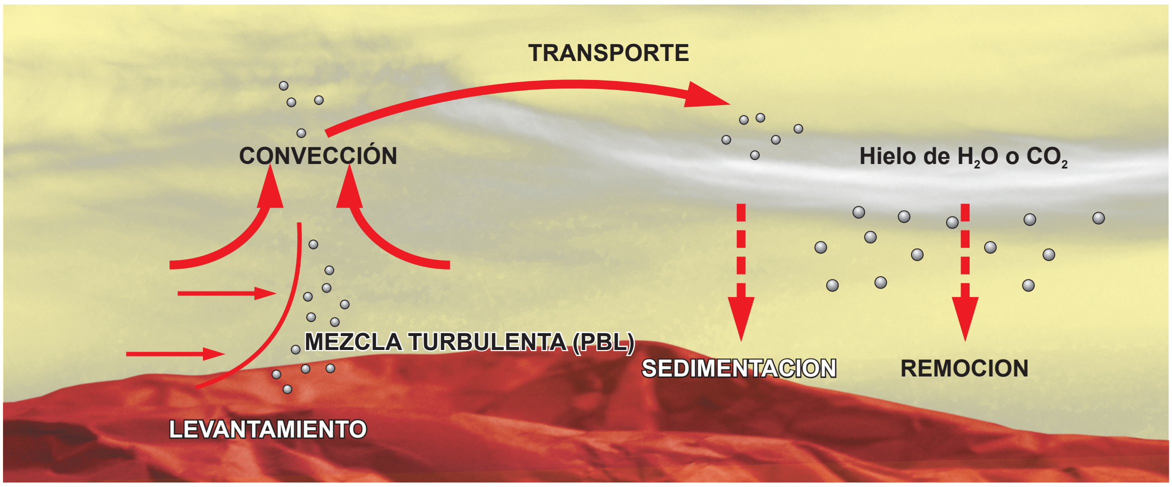


Figura 5.29: Ciclo del H_2O: El H_2O sublima desde la superficie, siendo transportado por la atmósfera, condensando y depositándose en la superficie. Adaptación de figura original de Francois Forget.

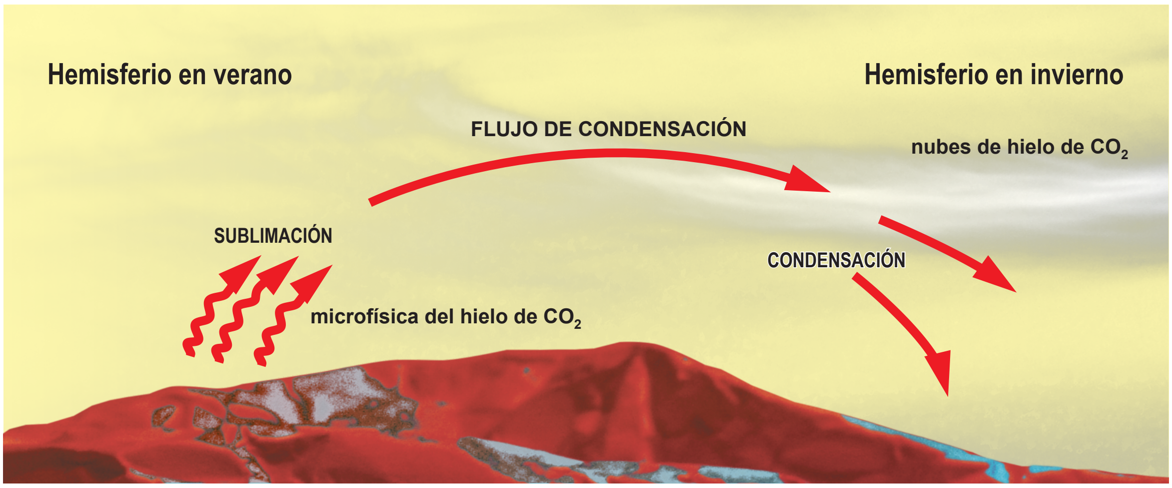


Figura 5.30: Ciclo del CO_2: En el hemisferio que experimenta el verano el CO_2 sublima desde la superficie, siendo transportado al hemisferio que experimenta el invierno, formando nubes y depositándose en la superficie. Adaptación de figura original de Francois Forget.

La captura heterogénea del HOx evidenciada por la distribución del ozono, permite explicar la estabilidad del dióxido de carbono. El HOx producido por el vapor de agua bajo la acción de la radiación solar regenera permanentemente el dióxido de carbono a partir del monóxido de carbono (CO), producido de su disociación.

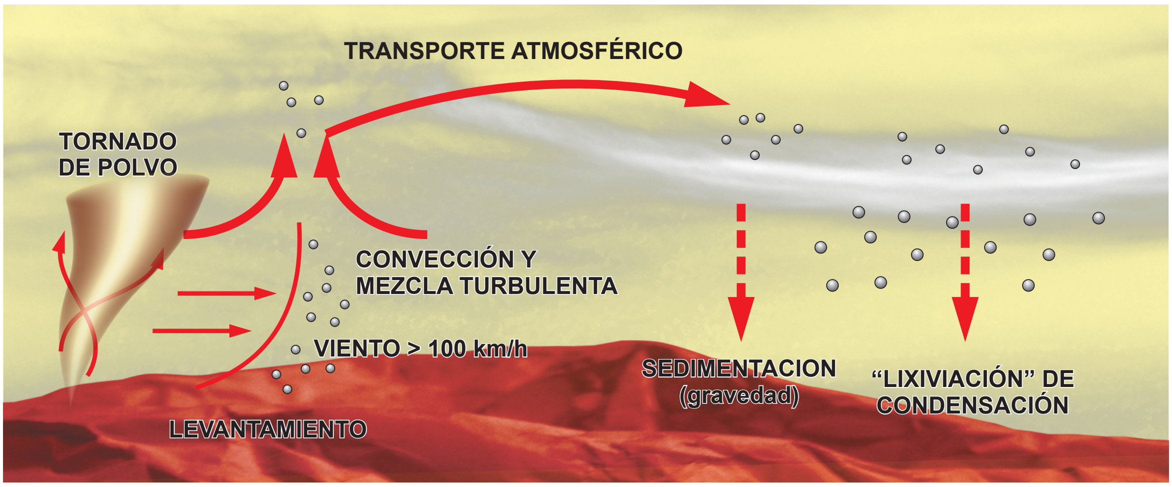


Figura 5.31: Ciclo del polvo marciano: Vientos, tormentas y tornados levantan el polvo, siendo transportado por la atmósfera, depositándose nuevamente en la superficie por su propio peso o siendo barridas por el material de las nubes. Adaptación de figura original de Francois Forget.

La dinámica atmosférica marciana es similar a la terrestre. La atmósfera marciana rota con el planeta. Uno de los patrones de circulación dominante es la célula de Hadley, el aire caliente que sube en los trópicos, para ser reemplazado por aire más frío se mueve desde las latitudes medias dando lugar a vientos alisios.

Cada año se producen dos máximos de presión y dos mínimos como resultado de la congelación y deshielo del dióxido de carbono de los polos. Produciendo variaciones en la presión atmosférica global de aproximadamente un 30 %. El movimiento de dióxido de carbono entre casquetes polares crea una circulación global sin parangón en la Tierra. Además, en el borde del casquete de hielo carbónico, los gradientes de temperatura producen fuertes vientos.

El campo magnético marciano es muy débil, esto podría ser consecuencia de la falta de convección en su núcleo. Sin embargo, Marte cuenta con un amplio espectro de campos magnéticos locales atribuidos a la variación espacial del magnetismo remanente en la corteza. En promedio, la corteza marciana está 10 veces más magnetizada que la terrestre. Es probable que la corteza marciana se magnetizara en los primeros cientos de millones de años de evolución, cuando poseía un campo magnético global intenso.

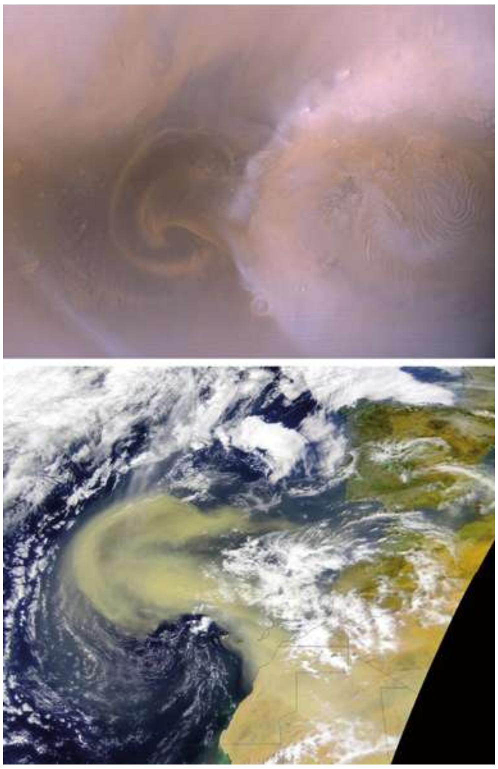


Figura 5.32: Arriba: fotografía de una gran nube de polvo que se aleja desde el polo marciano. Créditos: Mars Global Surveyor. Abajo: fotografía de una gran nube de polvo que se aleja desde el Desierto del Sahara hacia el Océano Atlántico. Créditos: SeaWiFs.

Marte posee una débil ionósfera a unos 130 [km]

de altura, y una magnetósfera fuera de la atmósfera, pero a la vez sobreponiéndose a ella. Algunas veces, las partículas de la atmósfera pueden entrar en la magnetosfera, y otras, las partículas de la magnetosfera pueden penetrar a la atmósfera.

Debido a que Marte no tiene un fuerte campo magnético dipolar, no se producen auroras polares, sin embargo, el campo magnético cortical marciano crea una concentración de flujos de electrones en la atmósfera marciana, para eventualmente inducir la formación de auroras altamente concentradas. Los mecanismos de formación-emisión localizada y controlada por anomalías de campo magnético cortical son únicos en el sistema solar.

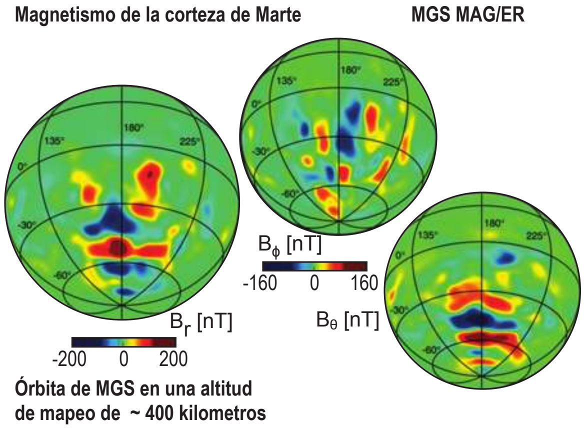


Figura 5.33: Mapas de las tres componentes (B_r, B_ϕ, B_θ) del campo magnético obtenidas por la *Mars Global Surveyor* (MGS). Las franjas roja y azul son el registro de un antiguo campo magnético de Marte, que cambió su polaridad. Créditos: NASA/JPL.

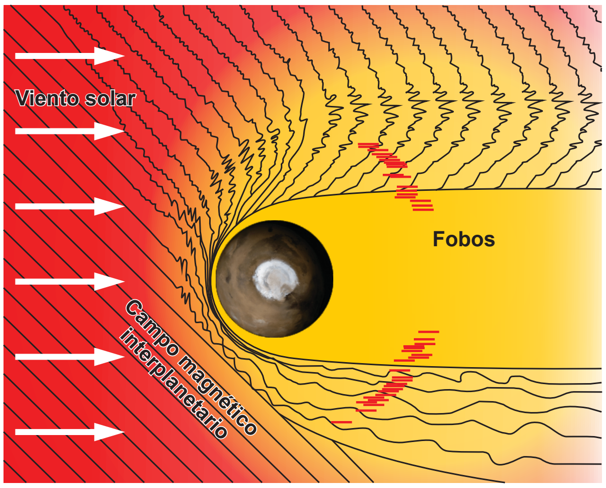


Figura 5.34: El campo magnético alrededor de Marte interactúa con el viento solar y el campo magnético interplanetario para dar origen a un conjunto de condiciones únicas cerca del planeta. Se ha dibujado en órbita MGS descubridora de la magnetósfera. Adaptación de figura original de NASA/JPL.

En el pasado remoto, el agua líquida fluía en la superficie en forma de ríos a los océanos primigenios, sin embargo, las condiciones atmoféricas actuales no son compatibles con la existencia de agua líquida en la superficie, por lo que la temprana atmósfera marciana debió ser más densa. El cambio de la densidad de la atmósfera marciana se debe a una importante disminución de la actividad geológica del planeta, no se ha observado tectónica de placas y los volcanes se han vuelto inactivos y por otra parte la radiación ultravioleta ayuda a la disociación de los gases atmosféricos como el agua, lo que unido a la poca masa del planeta, hacen que los gases más livianos escapen más rápidamente de la gravedad del planeta.

En 2003 y 2004 tres equipos independientes encontraron metano en la atmósfera de Marte, este metano posee valores de al menos 10 partes por 1000 millones, y varía de acuerdo a la ubicación en el planeta. Dado que el tiempo de residencia[18] del metano en la atmósfera marciana se estima cercano a los 400 años, debe haber una fuente activa que lo produce. Como veremos en el próximo capítulo, en la Tierra la fuente principal de metano atmosférico es de origen biológico, en Marte, pese a que la cantidad de metano es 40 millones de veces inferior a la de la Tierra, no se puede descartar aún un origen biológico de este metano. Volveremos a esto en el próximo capítulo.

[18]El tiempo de residencia representa el tiempo de permanencia de una sustancia en la atmósfera, es decir, el tiempo que transcurre para que desaparezca totalmente por reacciones o consumo de otro tipo.

5.1.5.2. Superficies

La superficie de Mercurio, al igual que la lunar, presenta numerosos cráteres de impacto. Pero, a diferencia de la Luna, Mercurio tiene enormes acantilados con estructuras que se extienden por miles de kilómetros a través de la superficie del planeta. Algunos de sus cráteres fueron formados durante un período de intenso bombardeo de cuerpos de grandes dimensiones, que terminó hace unos 3.900 millones de años. El cráter de impacto más grande es la cuenca *Caloris*, la cual tiene un diámetro de unos 1.500 [km]. Las ondas de choque producidas por el impacto deformaron la superficie en las antípodas, el extremo diametralmente opuesto del punto de impacto. En la Luna, la mayoría de las cuencas de impacto están rellenas por lava endurecida, formando los oscuros "mares", en cambio, Caloris es brillante por dentro y está salpicada con regiones de intensos colores, además las fotografías de la sonda MESSENGER, han permitido descubrir varios cráteres extraños ubicados en su interior. Rodeando la cuenca Caloris se ha evidenciado la existencia de respiraderos volcánicos.

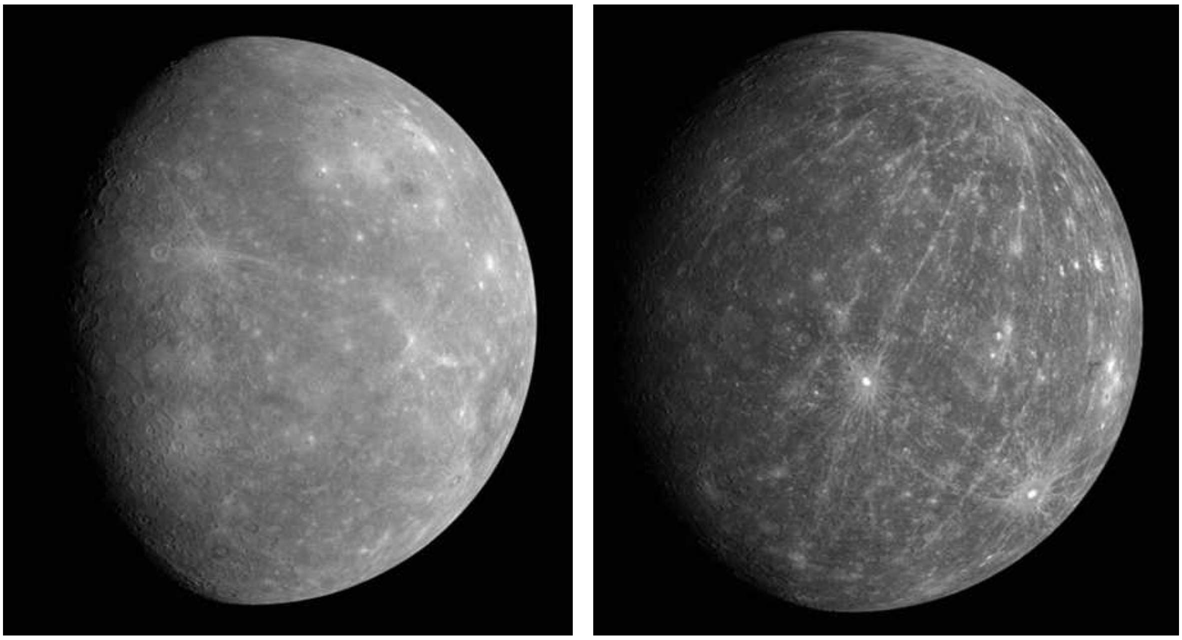


Figura 5.35: Fotografías de Mercurio tomadas por la sonda MESSENGER. Se observa un gran número de cráteres de impacto. En la zona superior derecha de la fotografía izquierda se observa la cuenca Caloris. Créditos: NASA/Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory/Carnegie Institution of Washington.

No se ha evidenciado tectónica de placas ni actividad volcánica en Mercurio, ésta habría terminado a menos de 1.000 millones de años de su formación.

La existencia de las cadenas montañosas que atraviesan el planeta de norte a sur y de nordeste a sureste, conocidas como *escarpas lobuladas*, hacen creer que es posible que el planeta se haya encogido cuando su núcleo de metal fundido se enfrió el cual producto de la disminución de la rotación produjo una disminución de la oblatitud (el achatamiento de un elipsoide).

Como hemos ya mencionado, existen grandes cambios de temperatura en la superficie de Mercurio (-170 °C por la noche a 350 °C por el día). Se ha descubierto que en las cercanías de las zonas polares, las ondas de radio reflejadas vienen polarizadas circularmente (ver Apéndice B), esto estaría evidenciando que Mercurio posee hielo en sus polos, los que se mantendrían protegidos por cráteres que nunca reciben la luz del Sol.

En el caso de Venus, la superficie se mantiene oculta por su atmósfera. Las primeras exploraciones de Venus, fueron durante la década de 1960 y la de los 70 estando a cargo de las sondas *Mariner* (EEUU) y *Venera* (URSS), estás últimas llegaron a posarse sobre la superficie. Hubo varias misiones que exploraron Venus entre finales de la década de 1970 y comienzos de la de 1980.



Figura 5.36: Fotografías de la superficie de Venus tomadas por la sonda Sovietica Venera 13. Venera 13 fue la primera misión que incluyó una camara de TV a color y la primera en tener éxito en fotografiar la superficie de Venus después de la sonda Venera 10. Venera 13 se posó sobre la superficie el 3 de Mazo de 1982. Créditos del procesado digital y correción de distorsiones: Don P. Mitchell.



Figura 5.37: Topografía de la superficie de Venus obtenida gracias a mediciones de Radar de la Sonda Magellan. Créditos: NASA/JPL.

En la década de 1990 la sonda *Magellan* mapeó la superficie mediante radar casi en un 100 %. De esta forma sabemos de la existencia de dos mesetas que equivaldrían a continentes. La meseta Norte, llamada *Ishtar Terra*[19], tiene una superficie similar a la de Australia, allí se encuentra la mayor montaña de Venus, (unos dos kilómetros más alta que el Monte Everest) el *Monte Maxwell* (en honor de James Clerk Maxwell). La meseta Sur, llamada *Aphrodite Terra*, tiene una superficie similar a la de Sudamérica. Entre estas mesetas existen depresiones llamadas *Atalanta Planitia*, *Guinevere Planitia* y *Lavinia Planitia*.

La superficie de Venus posee volcanes inactivos y no se ha evidenciado aún actividad tectónica. Gran parte de la superficie está cubierta por basalto recientemente solidificado. Las formaciones más antiguas presentes en Venus no parecen tener más de 800 millones de años, siendo la mayor parte del suelo considerablemente más joven (no más de algunos cientos de millones de años en su mayor parte), lo cual sugiere que Venus sufrió un cataclismo que afectó a su superficie no hace

[19]Ishtar es el nombre babilonio de Venus.

mucho tiempo en el pasado geológico que produjeron erupciones volcánicas masivas que inundaron su superficie con lava.

Los cráteres de impacto más pequeños observados tienen poco más de 3 kilómetros de diámetro, esto se debe a que la densa atmósfera provoca que los meteoritos más pequeños se desintegren antes de impactar la superficie.



Figura 5.38: Imagen de Marte. Dado que la atmósfera es transparente, cuando no hay tormentas de arena, la superficie es visible. Créditos: Philip James (University of Toledo), Steven Lee (University of Colorado) & NASA.



Figura 5.39: En la imagen el Valles Marineris, un gigantesco sistema de cañones que recorre el ecuador del planeta Marte justo al Este de la región de Tharsis (a la izquierda). Créditos: Jody Swann, Tammy Becker, Alfred McEwen (procesamiento de imágenes) & U.S. Geological Survey de Flagstaff, Arizona.

En el caso de Marte, su superficie puede generalmente verse a través de su atmósfera. El color característico de la superficie marciana se debe a grandes concentraciones de óxido férrico.

En la superficie de Marte se pueden apreciar volcanes, uno de ellos, el *Monte Olimpus*, es la montaña más alta del sistema solar, con sus cerca de 24 [km] de altura tiene cerca de 3 veces la altura del monte Everest, aunque con su enorme base de unos 550 [km], su pendiente es bastante suave. Otra de las características de la superficie marciana es el cañón *Valles Marineris* que posee 4.500 [km] de longitud, 200 [km] de anchura, y 11 [km] de profundidad máxima, esto es, diez veces más largo, siete veces más ancho y siete veces más profundo que el Gran Cañón de Arizona, llegando a cubrir un cuarto de la circunferencia ecuatorial del planeta, siendo el cañón más grande del sistema solar.

La temperatura media en Marte es -63 °C, aunque su valor dependerá de la ubicación geográfica y de la estación, alcanzando una temperatura máxima de 20 °C y un mínimo de -140 °C.

Como hemos mencionado, en el pasado remoto el agua líquida existía en grandes cantidades, suficiente como para formar océanos que cubrieran extensas zonas de la superficie por largos períodos. La evidencia geológica de la presencia de ríos, mares y océanos es contundente e irrefutable, además de erosión pluvial/fluvial y sedimentación que no pueden ser explicados a través de ablación por vientos. De esta forma, en torno a los 3.000 o 4.000 millones de años atrás el agua líquida fluyó con libertad en la superficie, y debía hallarse en grandes cantidades, por lo que Marte se pareció mucho más a la Tierra durante su primer tercio de historia que en la actualidad. La detección de minerales alterados por agua, tales como arcillas, óxidos de hierros hidratados y carbonatos en meteoritos marcianos[20], permiten suponer que la meteorización[21] producida por acción del agua ocurriera bajo la superficie (que es de

[20]Los meteoritos marcianos habrían sido expulsados de Marte producto de colisiones de cometas o asteroides.

[21]La meteorización es la alteración de la roca por la acción de agentes atmosféricos y/o biológicos. La

donde provienen los meteoritos), por lo que se espera que exista agua aún en el subsuelo.

Por otra parte en la superficie prácticamente no se han encontrado arcillas y carbonatos, esto se podría explicar con la existencia de aguas ácidas que destruyen los carbonatos e inhiben la formación de arcillas. Estas aguas ácidas serían resultado de deposiciones de azufre proveniente de actividad volcánica. El robot *Opportunity* ha detectado depósitos de azufre en zonas que no tienen presencias de arcillas. El azufre sería clave en la historia del agua marciana, ya que cuando éste aumentó en demasía, antes de que el planeta se inactivara geológicamente, habría producido lluvia ácida que habría alterado las rocas de la superficie y habría hecho prácticamente desaparecer las arcillas.

La persistencia de agua bajo la superficie podría explicar erosiones observadas en laderas de cráteres y cañones. El problema es que, como sabemos, el agua líquida no puede existir en la superficie, sin embargo, al brotar el agua, ésta se evapora lo que enfría la superficie, lo que puede producir que el agua detrás del afluente inicial se congele, formando un dique helado que luego de algún tiempo cedería a la presión del agua, permitiendo al torrente salir hacia la ladera. El agua formaría lodo (entre un 10 % y un 30 %) permitiendo que ésta no se evapore tan rápidamente y pueda deslizarse por las paredes de los cráteres, produciendo las erosiones observadas. Dado que el ancho de los torrentes producidos tan solo tienen unos pocos metros, serían relativamente recientes.

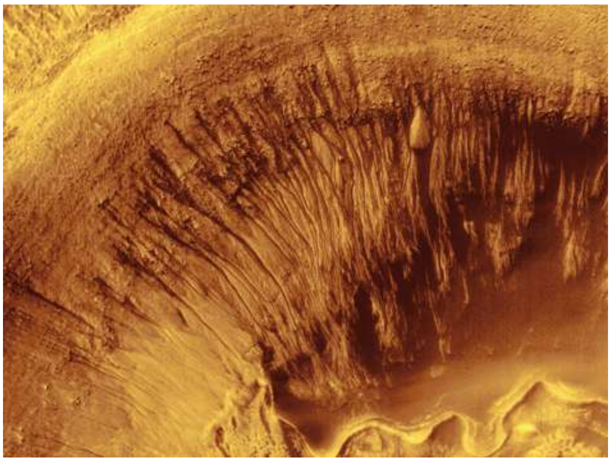


Figura 5.40: Las imágenes del crater Newton, revelan lo que parecen enormes canales formados por flujos de agua. En Marte, las condiciones atmosféricas no permiten la existencia de agua líquida, sin embargo, el agua pudo fluir desde el subsuelo de marciano. Créditos: Malin Space Science Systems, MGS, JPL, NASA.

La existencia de océanos en el pasado remoto y de agua bajo la superficie marciana permite mantener la esperanza de que pudieran existir microorganismos bajo la superficie, a pesar de los resultados negativos obtenidos por las *Viking* (ver capítulo 6).

5.1.5.3. Interiores

La determinación de la constitución del interior de un planeta es un problema netamente teórico que se apoya en el conocimiento que se tiene de la Tierra y la información obtenida por los telescopios y/o las misiones espaciales (tamaños y masas).

El modelo más simple del interior de un planeta rocoso es un modelo de dos capas donde se asume un núcleo metálico (usualmente de hierro y níquel) y un manto de silicatos.

Como se puede observar en la tabla 5.1, Mercurio, Venus y la Tierra tienen densidades similares. Si graficamos la densidad en función del radio (figura 5.41), vemos que Mercurio es mucho más compacto que los otros planetas rocosos, pues solo posee el 6 % de la masa terrestre.

---

roca sufre la acción de estos agentes, que tienden a descomponerla y desintegrarla, dejando los materiales que pueden ser movilizados por los agentes de la erosión. La acción geológica de la erosión por meteorización se lleva a cabo de forma física (por ruptura de la roca) y química (transformación de sus propiedades), actuando en conjunto.

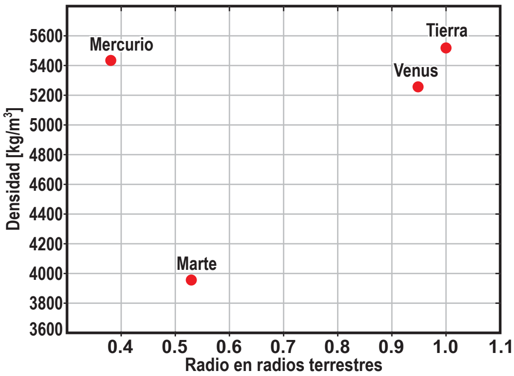


Figura 5.41: Gráfica de densidad versus radio para los planetas rocosos del sistema solar.

Para poder dar cuenta de la alta densidad de Mercurio, se requiere que posea un gran núcleo que ocupe gran parte del volumen del planeta ($\sim$ 42 %). Su composición química deber ser de un 70 % de metales y un 30 % de silicatos. Para explicar la existencia de este gran núcleo y su alta densidad, se ha sugerido que Mercurio habría sido un planeta más masivo y que producto de una gran colisión habría perdido parte del manto. Las colisiones en etapas tempranas, al parecer no serían inusuales, ya que como hemos visto, una colisión podría explicar la existencia del gran satélite que posee la Tierra, la Luna, y una colisión también podría explicar la lenta rotación retrógrada de Venus.

Mercurio, debido a su tamaño, debería haberse enfriado lo suficiente para que su núcleo se encuentre en estado sólido[22], por lo que no debería ocurrir efecto dínamo. El enigma de la existencia de campo magnético en Mercurio no ha sido aún resuelta, se cree que el núcleo debe estar dividido en dos regiones, y el núcleo externo debe tener otros elementos como azufre, que combinados con el hierro permitan bajar la temperatura de fusión en esta zona, permitiendo el estado líquido y con ello, el efecto dínamo.

El interior de Venus debe poseer un núcleo metálico de unos 3.000 [km] de radio, con un manto rocoso que forma la mayor parte del planeta. El campo magnético es muy débil, esto podría ser consecuencia de la lenta rotación.

Para el caso de Marte, no se posee un único modelo del interior. Si el núcleo marciano es metálico como el de la Tierra o de los meteoritos SNC (Shergotty-Nakhla-Chassigny) que supuestamente proceden de Marte, entonces el radio mínimo del núcleo es de unos 1.300 [km]. Si el núcleo está compuesto por materiales menos densos como una mezcla de azufre y hierro, entonces el radio máximo sería probablemente inferior a los 2.000 [km]. Debido al tamaño de Marte, su núcleo no sería líquido, esto es consistente con el débil campo magnético global que posee y también con la inactividad volcánica y tectónica.

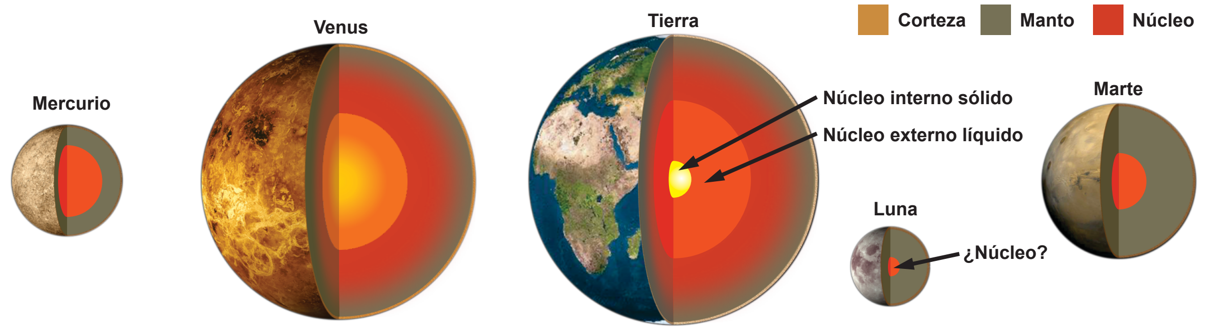


Figura 5.42: Modelos del interior de los planetas rocosos y la Luna. Observe que Mercurio posee un gran núcleo. Adaptación de figura original de NASA.

A partir de la altura que alcanzan las montañas y volcanes más altos, y del equilibrio isostático[23], se puede deducir que en general las cortezas de los planetas rocosos son más gruesas que la terreste.

[22]El tiempo de enfriamiento de los planetas es proporcional al radio del planeta, por lo que los planetas como Mercurio y Marte ya deberían haberse enfriado.

[23]La isostasia es la condición de equilibrio que presenta la superficie de un planeta debido a la diferencia

5.1.6. Planetas gigantes

Como hemos deducido en la sección 5.1.3 uno de los dos tipos de planetas del sistema solar son aquellos gigantes y poco densos (ver figura 5.3 y tabla 5.1), los denominados planetas gigantes, compuestos principalmente de hidrógeno: 90 % Júpiter, 97 % Saturno, 83 % Urano y 74 % Neptuno; y de helio: 10 % Júpiter, 3 % Saturno, 15 % Urano y 25 % Neptuno. Además en Urano y Neptuno el 2 % es metano, gas que en Júpiter y Saturno hay solo trazas.

Los planetas gigantes se subclasifican en *gigantes gaseosos*: Júpiter y Saturno, y *gigantes helados*: Urano y Neptuno.

Los planetas gigantes son rápidos rotadores y al estar compuestos por fluidos poseen rotación diferencial, los períodos son del orden de 10 horas en Júpiter y Saturno y de 16-17 horas para el caso de Urano y Neptuno.

Excepto Urano, los planetas gigantes radian calor desde su interior en cantidades similares a la energía recibida por la irradiación solar absorbida en la alta atmósfera. De esta forma, los planetas gaseosos se enfrían lentamente, Júpiter por ejemplo que radia más de lo que recibe del Sol (~ 12 [W/m^2]), se enfría a razón de un grado cada millón de años, de forma que al enfriarse, el planeta se contrae a razón de tres centímetros al año.

Urano tiene una particularidad orbital que está dada por la inclinación del eje de rotación que tiene un valor de 97,77°, esto hace que literalmente rode por su órbita, apuntando en ciertas zonas de su órbita, prácticamente uno de sus polos hacia el Sol. Pese a ello, los vientos siguen moviéndose en el sentido de rotación del planeta y no del Polo al Ecuador.

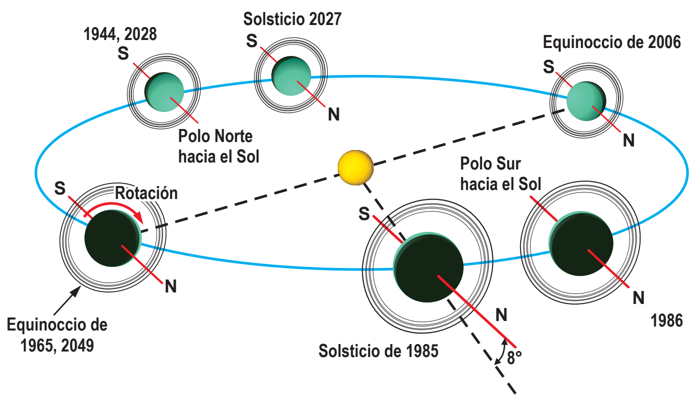


Figura 5.43: La inclinación del eje de rotación de Urano en casi 90°, hace que en ciertas posiciones de su órbita los polos apunten hacia el Sol.

5.1.6.1. Anillos

Uno de los rasgos más notables de los planetas gigantes es la presencia de anillos, aunque solo los anillos de Saturno son lo suficientemente gruesos y extensos como para ser vistos fácilmente desde la Tierra. Están compuestos de polvo y otras partículas pequeñas que orbitan muy cerca de los planetas, en general a menos de un radio del planeta y se ubican en el plano ecuatorial en una región muy delgada y al interior o cerca de los anillos se pueden encontrar cuerpos de tamaños algo mayor que constituyen satélites.

Respecto del origen en general se acepta que habría sido producido por un satélite que se habría destruido posiblemente por las fuerzas de marea. Aunque en el caso particular de algunos anillos podrían tener otro origen.

Los anillos de Saturno están agrupados en siete regiones principales separadas por regiones más o menos vacías denomindas *divisiones*. Cada región se designa por una letra cuyo orden es asignado de acuerdo a su fecha de descubrimiento. Sólo los anillos principales

de densidad de sus partes. Se resuelve en movimientos verticales (epirogénicos) y está fundamentada en el principio de Arquímedes.

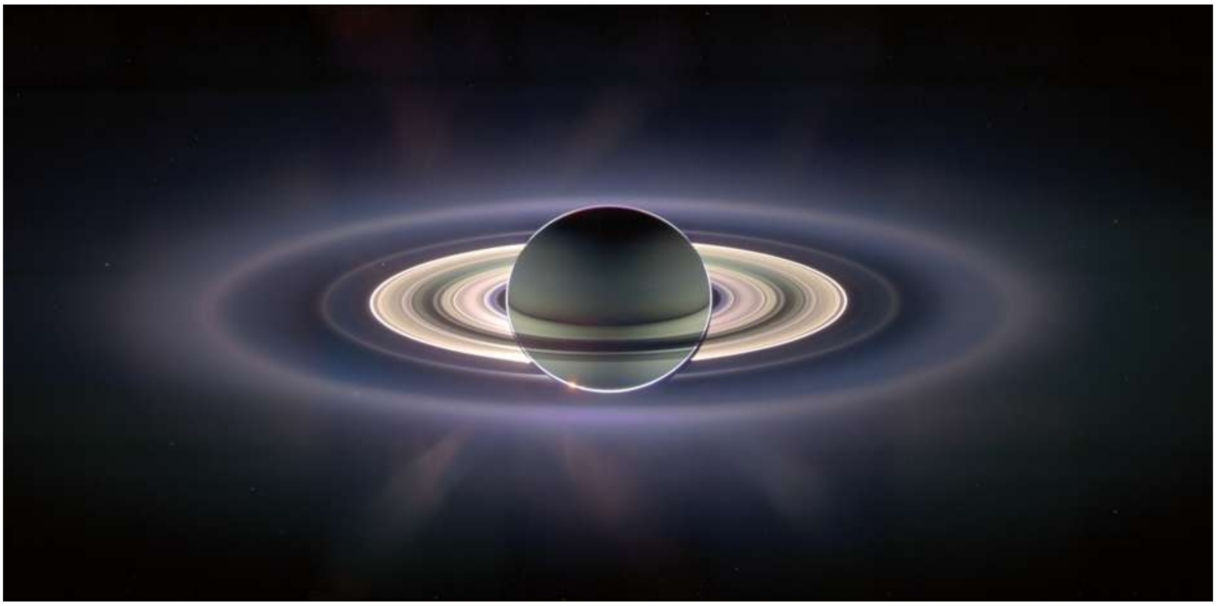


Figura 5.44: Los anillos de Saturno fotografiados por la sonda Cassini cuando el planeta ocultaba al Sol. Son visible el anillo E y el anillo exterior. También es visible a la izquierda justo por encima de los anillos principales un casi inobservable punto azul pálido: la Tierra. Créditos: CICLOPS, JPL, ESA, NASA.

(A, B y C) se ven fácilmente mediante telescopios situados en la Tierra. Los anillos A y B están separados por la *división de Cassini*, el anillo A incluye la *división de Encke*. Están constituidos de polvo y hielos.

Júpiter tiene un anillo que es muy sutil y casi transparente. Hacia el interior del anillo, se extiende un disco de partículas todavía más débil, que posiblemente llega hasta la atmósfera del planeta. Un halo de partículas confiere al sistema un espesor vertical de unos 20.000 kilómetros. Están constituidos de silicatos.

Urano tiene al menos once anillos muy sutiles. Nueve de ellos, se detectaron desde la Tierra observando un cambio en el brillo de las estrellas de fondo al ser ocultadas por los anillos. Se designan por números o letras griegas. Están constituidos de silicatos y son muy oscuros.

Los anillos de Neptuno son prácticamente invisibles. Cuando se oculta la luz del planeta, aparecen dos delgados anillos muy bien definidos y un tercer anillo difuso.

5.1.6.2. Atmósferas y magnetósferas

La capa superior de las atmósferas están pobladas de nubes y nieblas, formadas por partículas en suspensión. A presiones comprendidas entre 0,5 y 10 [bar] y temperaturas entre -150 °C y 0 °C de los gigantes gaseosos, se forman capas de nubes constituidas por amoníaco (NH_3), hidrosulfuro de amonio (NH_4SH) y agua, y en los gigantes helados a temperaturas de unos -210 °C las nubes están constituidas de metano.

Probablemente el rasgo más característico de Júpiter son sus nubes, en particular una región conocida como la *gran mancha roja* descubierta por primera vez en el siglo XVII y que aunque está lentamente reduciendo su tamaño, se mantiene hasta nuestros días. La gran mancha roja corresponde al mayor vórtice anticiclónico de Júpiter y del sistema solar, y no se sabe por qué ha logrado sobrevivir tanto tiempo, quizás por el hecho que el planeta no tenga una superficie. Otra formación meteorológica semejante fue observada

por la sonda *Voyager 2* en Neptuno en 1989 y es conocida como la *gran mancha oscura* de Neptuno.

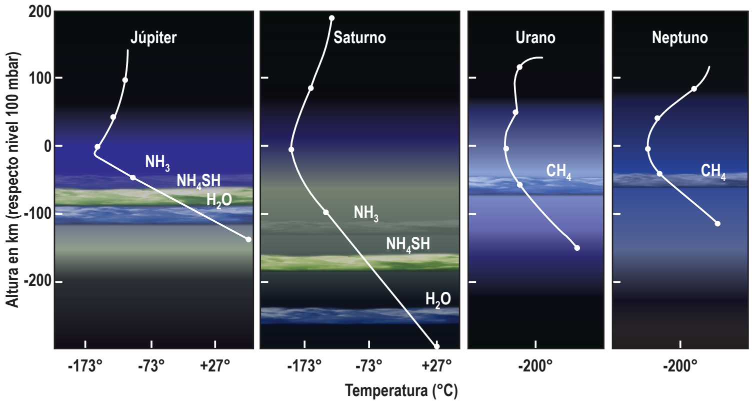


Figura 5.45: Nubes y perfiles de temperatura de las atmósferas de los planetas gigantes. Fuente: The New Solar System. 4th Edition, Cambridge University Press 1999.

Las tormentas son una característica importante en este tipo de planetas, en Saturno por ejemplo, se han observado manchas blancas correspondientes a tormentas cada 20-30 años, y en los polos se han observado ciclones que permiten observar capas de nubes más profundas y que en el caso del polo norte forman una estructura hexagonal nunca antes vista y que no se ha podido explicar aún.

Pese a recibir tan poca energía del Sol, las atmósferas son muy dinámicas, tal como se ha evidenciado a través de telescopios de tierra, telescopios espaciales y las distintas misiones que se han acercado a estos planetas (*Voyayer 1* y *2*, *Galileo* y *Cassini*). Las observaciones de las nubes muestran que éstas se mueven a lo largo de franjas paralelas casi sin movimientos entre el ecuador y los polos. En el caso de los gigantes gaseosos, los vientos alternan de dirección con la latitud (figura 5.46) con unas 8 corrientes de chorro por hemisferio en Júpiter y 4 en Saturno y una franja ancha en el ecuador con velocidades[24] del orden de 100 [m/s] y 500 [m/s] respectivamente. En este último caso, dicha velocidad corresponde a 2/3 de la velocidad del sonido en el medio. Por otra parte, en el caso de los gigantes helados existe solo una corriente hacia el oeste con velocidades de 100 [m/s] y 400 [m/s] en Urano y Neptuno respectivamente.

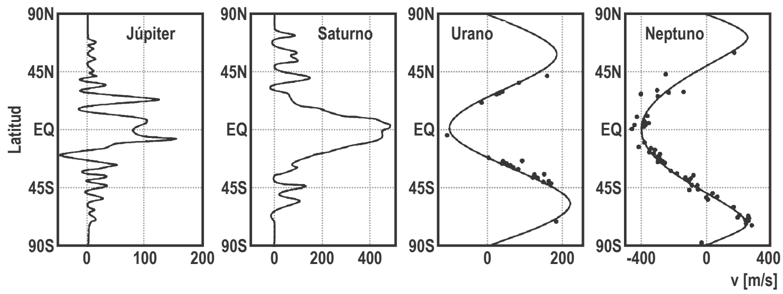


Figura 5.46: Perfil de vientos zonales en los planetas gigantes. El eje vertical representa la latitud en grados, y el eje horizontal la velocidad del viento zonal (positiva hacia el este, negativa hacia el oeste) respecto a la velocidad de rotación del campo magnético. Fuente: Vientos en los planetas gigantes, Sánchez Lavega, A., Investigación y ciencia 332, mayo 2004.

No se conoce aún como se originan los vientos, su extensión en profundidad, cómo se genera el intenso chorro ecuatorial hacia el Este en Júpiter y Saturno, o que papel juegan las diferentes fuentes de energía (la radiación solar y el calor interno) y como es posible que con la poca energía disponible se produzcan estos vientos tan intensos.

Los modelos que intentan explicar los vientos observados son principalmente de dos tipos, los llamados modelos de tipo superficiales en que es la insolación la que, al igual que en los planetas terrestres, produce la circulación atmosférica y los modelos de tipo

[24] Dado que los planetas gigantes no poseen una superficie a la cual referir las velocidades, éstas se miden respecto a la velocidad de rotación del campo magnético que se supone rota a la velocidad del interior del planeta.

profundo en que es el calor interno el que la produce, incluyendo el calor que proveen las transiciones de espín[25] (ver Apéndice C).

Ciertamente un buen modelo debería tener en cuenta las dos fuentes principales de energía, el problema es saber cuan importante es cada fuente, al menos la fuente interna debe ser relativamente constante, en cambio la irradiación solar dependerá de la posición del planeta en la órbita y de la inclinación del eje de rotación, es decir, de las estaciones. En este aspecto, el caso de Saturno, que posee la órbita más excéntrica de este tipo de planetas, debe dar información. Las observaciones muestran cambios estacionales en la atmósfera de Saturno, principalmente en la región ecuatorial.

Se cree que las atmósferas de los gigantes gaseosos está dominada por una dinámica más profunda en la atmósfera y en menor medida por la irradiación solar y algún fenómeno atmosférico de gran intensidad, en que las corrientes zonales pueden sufrir variaciones en su velocidad.

Los campos magnéticos de los planetas gaseosos son muy intensos, podemos saber de su existencia debido a la presencia de auroras que pueden incluso ser observadas desde la Tierra.

Júpiter posee una enorme magnetósfera, de mayor tamaño que el Sol. Su cola es tan extensa que alcanza la órbita de Saturno, por lo que a veces éste se encuentra al interior de ella. Su eje magnético se encuentra 10° inclinado respecto del eje de rotación.

Saturno también posee una extensa magnetósfera. Su eje magnético es coincidente con su eje de rotación.

Urano y Neptuno tienen ejes magnéticos muy inclinados respecto del eje de rotación: 59° y 47° respectivamente. Además en ambos casos los ejes magnéticos se encuentran descentrados, por lo que las fuentes del campo magnético no se encontrarían cercanas al centro, quizás, el campo global sea resultado de múltiples dínamos rotando en diferentes ejes.

5.1.6.3. Interiores

Los planetas gigantes gaseosos están compuestos principalmente de fluidos (hidrógeno y helio), que se encuentran en estado gaseoso en la región más externa y que denominaremos atmósfera y que a medida que se va hacia el interior, se encuentran licuados, es decir, cambian de estado, por lo que a diferencia de los planetas rocosos, no es posible encontrar en ellos una superficie sólida. La atmósfera, de unos 13.000 [km] en Júpiter y unos 24.000 [km] en Saturno, está compuesta principalmente de hidrógeno molecular, solo en la zona más externa se encontraría la capa de nubes visible que caracteriza a estos planetas. El hidrógeno molecular se transforma progresivamente en líquido hacia el interior, al alcanzar una presión del orden de 1-3 [Mbar] y temperaturas del orden de 6.000 °C, se rompe la molécula, esto ocurre a un radio de 0,8 R_J y 0,6 R_S. El hidrógeno ionizado constituye un plasma conductor eléctrico, comportándose como un metal, sería aquí donde se generarían los intensos campos magnéticos de estos planetas. Se cree que el núcleo estaría compuesto de rocas y minerales, algo así como un gran embrión rocoso de unas 10-15 $M_\oplus$.

Los planetas gigantes helados a diferencia de los gigantes gaseosos no están compuestos casi solo de hidrógeno y helio, estarían compuestos de hidrógeno y helio gaseoso, hielos

[25]En el hidrógeno son dos estados posibles en la orientación de los espines del protón, paralelos o antiparalelos, comportándose ambos como dos gases distintos, liberándose calor durante la transformación de uno en otro. Sería esta una fuente adicional de energía para los movimientos.

y rocas. Su atmósfera sería convectiva y estaría compuesta de hidrógeno, helio y hielos, bajo esta capa habría una capa de hielos convectivos, principalmente de agua, amoníaco y metano, y más abajo una capa de hielos y rocas.

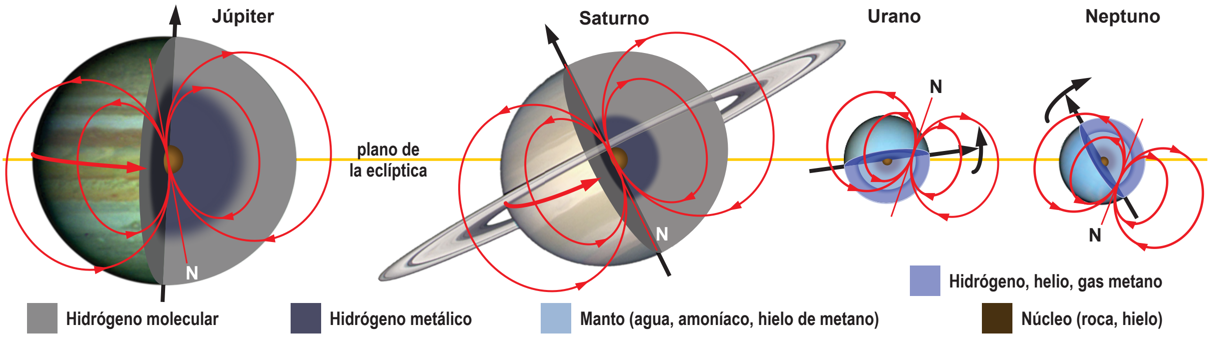


Figura 5.47: Modelos del interior de los planetas gigantes.

5.1.7. Planetas enanos

Como hemos visto el primer planeta enano descubierto fue Ceres que inicialmente fue considerado como planeta por casi cerca de 50 años y luego fue considerado el mayor de los asteroides por otros 156 años hasta que en 2006 se le asignó la nueva categoría de planeta enano.

Ceres es el planeta enano más cercano al Sol, se encuentra inmerso en el interior del cinturón de asteroides. Sus dimensiones son: 975×909 [km], por lo que no es esférico (ver figura 5.48).

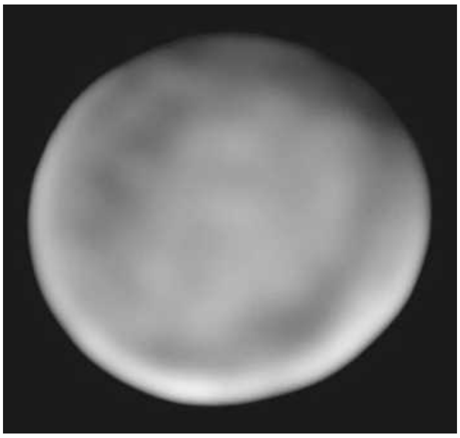


Figura 5.48: Ceres visto desde el observatorio Keck Créditos: Dumas C. et al. NASA/JPL.

El interior de Ceres podría estar compuesto de un núcleo rocoso rodeado de un manto de hielo de agua y una corteza exterior cubierta de polvo (figura 5.61). Debido a su pequeño tamaño no sería geológicamente activo, se habría ya enfriado, por lo que no se espera que posea un campo magnético global ni tampoco una atmósfera.

Plutón al igual que Ceres, fue clasificado originalmente como un planeta, hasta que se comenzaron a descubrir otros cuerpos con características similares, sin embargo, Ceres es el mayor de los objetos del cinturón de asteroides, en cambio Plutón, siendo uno de los mayores objetos del cinturón de Kuiper, no es el mayor de ellos.

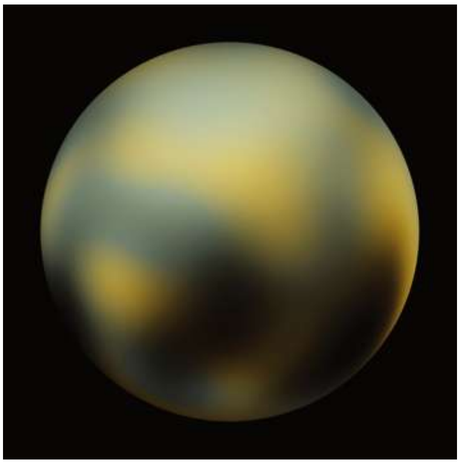


Figura 5.49: Plutón fotografiado con el telescopio espacial Hubble. Créditos: NASA, ESA, & M. Buie (Southwest Research Institute).

Dada la lejanía de Plutón (30 - 50 [UA]), se ha necesitado de mucho tiempo para obtener información de él, por ejemplo en evidenciarse que su tamaño era pequeño con respecto al resto de los planetas y que se encontraba al interior del cinturón de Kuiper.

En 1950, Gerald Kuiper (1905 - 1973) logró la primera medición aproximada del diámetro de Plutón, el

cual estimó en poco más de 5.800 [km]. En 1965, la ocultación de una estrella por Plutón, confirmó que su diámetro no podía ser mayor que 6.700 [km], ese mismo año se descubrió que su órbita se encuentra en resonancia 3:2 con Neptuno.

En 1976, se descubre metano congelado en su superficie y dos años más tarde se observa en una fotografía que el planeta tiene una forma alargada como una pera (figura 5.50), dado que otras estrellas no aparecían deformadas y que dicha forma desaparecía y reaparecía, se llegó a la conclusión que Plutón posee un satélite: Caronte. Con este descubrimiento y aplicando la tercera ley de Kepler deducida por Newton se pudo determinar la masa del sistema doble. En 1980, una ocultación estelar revela que el radio de Caronte es cercano a los 600 [km].

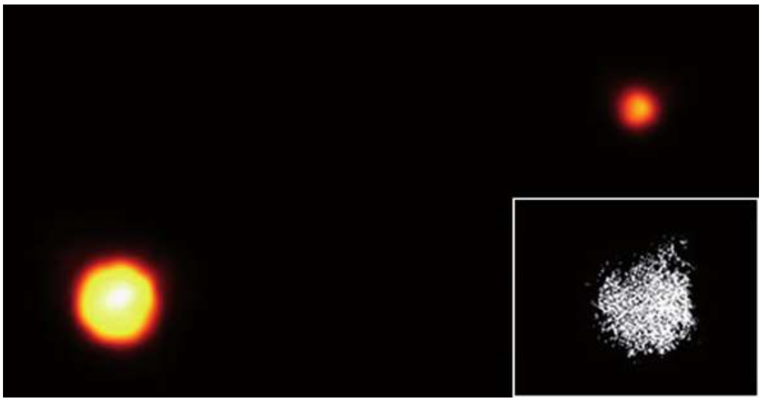


Figura 5.50: Plutón y Caronte vistos a través del telescopio espacial Hubble. Créditos: R. Albrecht, ESA/ESO Space Telescope European Coordinating Facility & NASA. Abajo a la derecha la fotografía del descubrimiento de Caronte. Créditos: U.S. Naval Observatory.

Plutón y Caronte poseen rotación sincrónica (ver Volumen I, sección 3.2.1), y dado que la razón de tamaños es cerca de 2:1, son considerados como un sistema doble de planetas.

Entre los años 1985 y 1990, el plano de órbita de Caronte queda en la linea de visión de la Tierra, lo que produce una serie de eclipses y ocultaciones mutuas, lo que lleva a que en 1986 se obtenga la primera determinación confiable del radio de Plutón y Caronte. Plutón es más pequeño que siete satélites del sistema solar (la Luna, Io, Europa, Ganímedes, Calisto, Titán y Tritón).

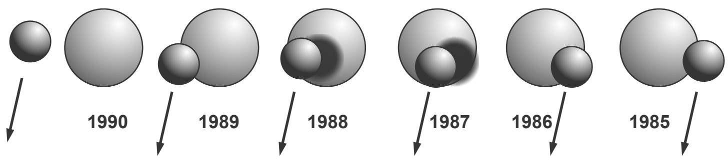


Figura 5.51: Serie de eclipses mutuos entre Plutón y Caronte entre los años 1985 y 1990. Adaptación de figura original de Young et al. AJ. 117, 1063–1076 (1999).

En 1987 se descubre hielo de agua sobre Caronte y en 1988 una ocultación estelar revela la presencia de una atmósfera en Plutón, descubriéndose también la existencia de capas polares. En 1992, se descubre nitrógeno (N_2) y monóxido de carbono (CO) en estado sólido. La presencia de la atmósfera estaría relacionada a la relativa cercanía al Sol (figura 5.52) que sublima el metano de la superficie y produce una atmósfera, a medida que el planeta en su movimiento orbital se aleja, vuelve a caer en forma de nieve, lo que produce una regeneración de la superficie y podría explicar las características superficiales observadas con el telescopio espacial Hubble.

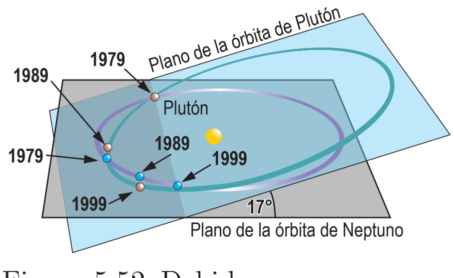


Figura 5.52: Debido a que posee una órbitra muy excéntrica, entre enero de 1979 al 11 de febrero de 1999 Plutón se encontró más cerca del Sol que Neptuno.

En 1999, el descubrimiento de cuerpos mayores del cinturón de Kuiper reabre la polémica sobre si Plutón debiera ser reclasificado, sin embargo, ese mismo año la unión

astronómica internacional (IAU) declara a Plutón oficialmente como planeta; sin embargo, mantener a Plutón como planeta se volvió insostenible con el descubrimiento de los *plutinos* (ver tabla 5.3), objetos con características orbitales similares a Plutón y el descubrimiento de otros planetas similares a Plutón en el cinturón de Kuiper, por lo que en el año 2006 se reconsideró el estatus de Plutón y se creó para él y los otros objetos similares la nueva clasificación de planetas enanos.

	Plutón	Caronte
Período de Rotación:	6,387 [d]	6,387 [d]
Período de Traslación:	248 [a] 197 [d] 5,5 [h]	6,387 [d]
Radio:	1150 - 1215 [km]	600 - 640 [km]
Densidad:	Cerca de 2 [g/cm^3]	1 - 2 [g/cm^3]
Hielos superficiales:	CH_4, N_2, CO, ?	H_2O, ?
Atmósfera:	Confirmada	Improbable

Tabla 5.2: Características de Plutón y Caronte.

El interior de Plutón (figura 5.61) estaría compuesto por un núcleo rocoso cubierto con un manto de hielo de agua y sobre éste una corteza helada compuesta de hielos de nitrógeno (N_2), metano (CH_4), monóxido de carbono (CO) y otros compuestos orgánicos.

Plutón posee un complejo conjunto de satélites, además de Caronte, coplanares: Nix ($d \sim 32$ [km]), Hydra ($d \sim 113$ [km]), P4 ($d \sim 13 - 34$ [km]) y P5 ($d \sim 9{,}6 - 24$ [km]). Estos satélites podrían ser vestigios de antiguas colisiones del planeta con otros objetos del cinturón de Kuiper, por lo que se cree que debe haber muchos más pequeños satélites que son invisibles.

En julio de 2015 la sonda de la NASA *New Horizons* sobrevolará Plutón y posteriormente Caronte y tras dejar atrás Plutón, la sonda probablemente sobrevuele uno o dos objetos del cinturón de Kuiper.

Eris es el más masivo y de mayor tamaño de los planetas enanos conocidos. Fue descubierto en 2005 y durante algo más de un año fue considerado por sus descubridores y los medios de comunicación como el décimo planeta del sistema solar.

La órbita de Eris es bastante inclinada (44,19°) por lo que es considerado un objeto dispersado del disco (SDO por acrónimo en inglés: *Scattered disk objects*) por la influencia gravitacional de Neptuno, además su órbita es bastante excéntrica ($e = 0{,}44$), por lo que su distancia al Sol varía entre 37,77 [UA] y 97,56 [UA]. Su período orbital es de 557 [a] y al igual que Plutón se encuentra en resonancia orbital con Neptuno, por lo que es también un *plutino*. Posiblemente, la gran inclinación de su órbita puede ser la causa de que no haya sido descubierto con anterioridad, ya que la mayoría de las búsquedas de objetos grandes en las áreas más alejadas del sistema solar se concentran en el plano de la eclíptica.

La estructura de Eris sería similar a la de Plutón (figura 5.61); con un núcleo rocoso, un manto de hielo y una superficie con presencia de metano helado, metano diluido en nitrógeno y moléculas orgánicas complejas, producidas por la fotodisociación del metano.

Eris posee un satélite conocido, Disnomia.

Junto con el anuncio del descubrimiento de Eris, se anunció el descubrimiento de otros dos planetas enanos del cinturón de Kuiper: Haumea (la diosa de la fertilidad y del nacimiento en la mitología hawaiana) y Makemake (deidad polinésica, en la mitología pascuense es el creador del mundo). Aunque no se ha podido determinar los tamaños de estos cuerpos, se estima que Makemake, podría ser ligeramente mayor que Haumea.

Al igual que Eris y Plutón, Haumea posee una órbita notablamentente inclinada (28,19°) y relativamente excéntrica ($e = 0{,}19$), por lo que su distancia al Sol varía en-

tre 35,16 [UA] y 51,53 [UA]. Su período orbital es de 285,4 [a].

Makemake también posee una órbita inclinada (28,96°) y relativamente excéntrica ($e = 0{,}16$), por lo que su distancia al Sol varía entre 38,51 [UA] y 53,07 [UA]. Su período orbital es de 309,88 [a].

Haumea posee dos satélites conocidos, *Hi'iaka* y *Nāmaka*. Hi'iaka se encuentra a una distancia de 50.000 [km] y un período orbital de 49 [d]. Makemake no tiene satélites conocidos.



Figura 5.53: Comparación de tamaños entre los planetas enanos con la Tierra y la Luna. Créditos: NASA.

Existen otro par de objetos transneptunianos que podrían ser incluidos en la lista de planetas enanos: (50000) Quaoar y (90377) Sedna.

Quaoar (fuerza de la creación adorada por la tribu Tongva, aborígenes de la actual Los Ángeles, California) se encuenta en el cinturón de Kuiper. Posee un satélite, Weywot.

Sedna (diosa del mar y de los animales marinos en la mitología esquimal) posee una órbita extremadamente excéntrica ($e = 0,857$), lo que hace que la mayor parte del tiempo, al igual que un cometa, se encuentre alejado del Sol (figura 5.54). Su distancia al Sol varía entre 76 [UA] y 960 [UA], por lo que tarda unos 11.400 años en recorrer su larga y elongada órbita. Se piensa que la forma particular de la órbita se habría producido por una estrella que pasó cerca (a unos 800 [UA]) en los primeros 100 millones de años de la existencia del sistema solar.

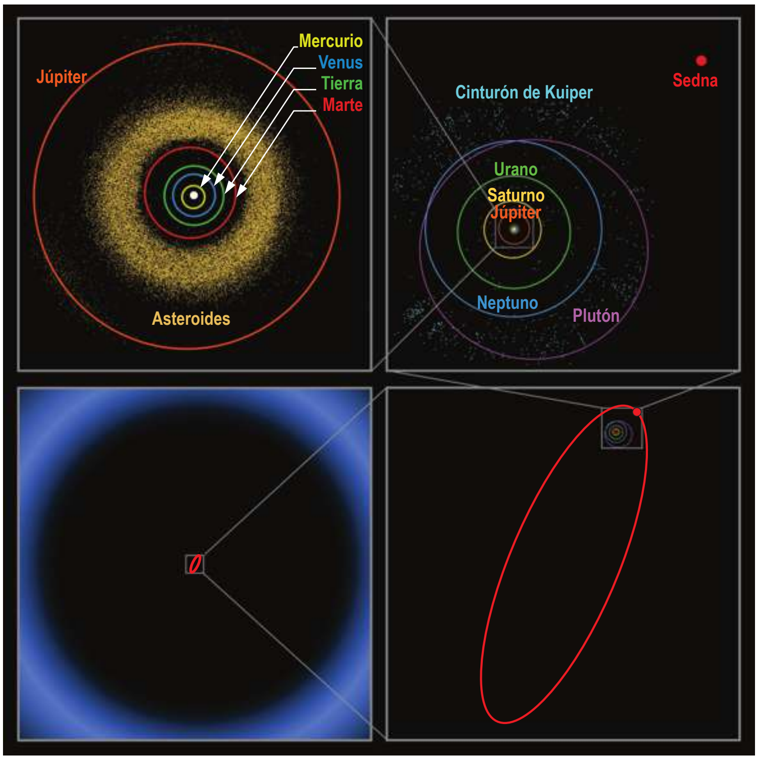


Figura 5.54: Comparación de tamaños de la órbita de Sedna con las órbitas de los planetas. Créditos: NASA/JPL-Caltech/R. Hurt (SSC-Caltech).

5.1.8. Satélites

Se denomina satélite a un cuerpo celeste que orbita en torno a otro, distinto a una estrella, mucho más masivo que él. Los hay de distintas masas y tamaños, en algunos casos pueden tener masas o tamaños planetarios. Los mayores son esféricos como por ejemplo *Ganímedes* de Júpiter y *Titán* de Saturno, y los más pequeños tienen forma irregular como por ejemplo *Fobos* y *Deimos* de Marte, y *Amaltea* de Júpiter. *Ganímedes* y *Titán* poseen tamaños mayores a Mercurio.

Los mayores satélites de los diferentes planetas reciben su nombre de personajes mi-

tológicos, excepto los satélites de Urano, cuyos nombres conmemoran personajes de obras clásicas de teatro.

5.1.8.1. Luna

La palabra Luna proviene directamente del latín y ésta de una forma más antigua; *losna*, que a su vez deriva de *louksna* o *leuksna* de raíz indoeuropea *leuk*, por lo que Luna significaría luminosa o que ilumina.

Como hemos mencionado con anterioridad el sistema Tierra-Luna es más bien un sistema doble de planetas o un sistema binario de planetas. Pese a ello, la Luna es tradicionalmente considerada como satélite de la Tierra, debido a ello ha sido incluída aquí.

En los capítulos 2 y 3 (Volumen I) y en este capítulo, hemos hablado en varias ocasiones de la Luna, por lo que aquí nos restringiremos a solo algunas características no estudiadas anteriormente.

La primera característica que se observa es que desde la Tierra siempre es visible el mismo hemisferio (figura 5.55), la denominada cara visible. La cara oculta de la Luna[26] fue fotografiada por primera vez el 10 de octubre de 1959 por la sonda soviética *Lunik 3*. Las fotografías revelan que este hemisferio es mucho más brillante y más homogéneo que el hemisferio visible (figura 5.56), pues a diferencia del hemisferio visible, cerca del 32 % de la superficie son mares, el lado oculto prácticamente no tiene mares.

En realidad es observable el 59 % de la superficie lunar, esto se debe a un movimiento de la Luna denominado *libración* y que corresponde a un balanceo que permite ver, desde la Tierra, zonas que sin este movimiento no podríamos ver.

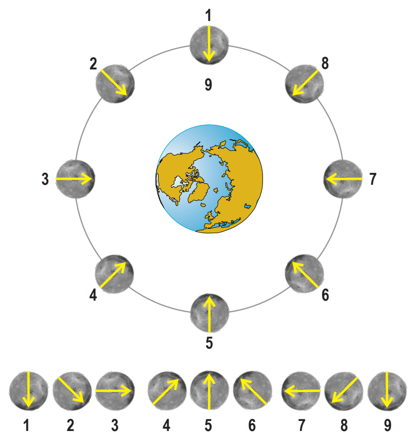


Figura 5.55: Se ha dibujado una flecha fija sobre la Luna y que siempre apunta hacia la Tierra. Se puede observar que la flecha (y por ende la Luna) completa una revolución sobre su propio eje en el mismo tiempo que la Luna completa una revolución en torno a la Tierra.

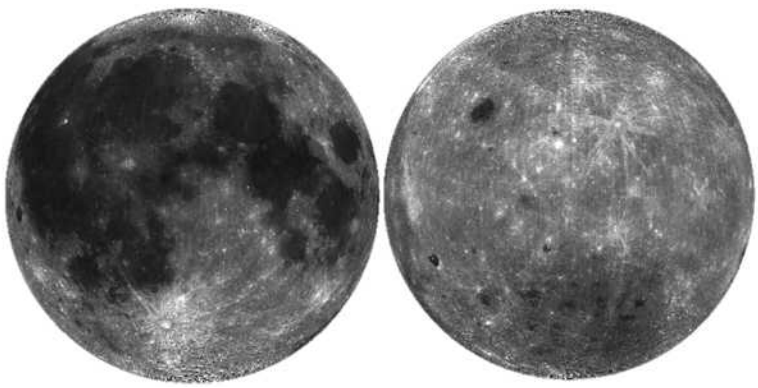


Figura 5.56: Fotografías del hemisferio visible (izquierda) e invisible (derecha) de la Luna. Créditos: NASA.

Los mares lunares están compuestos de basalto. Se habrían formado producto de grandes colisiones que ocurrieron sobre la cara visible y que habrían perforado la corteza dejando salir parte del basalto fundido que existía bajo la delgada corteza. El basalto sale en estado líquido por la región perforada, rellenando las regiones más bajas. Posteriormente

[26]Es importante destacar que no hay un lado o cara oscuro/a fijo, pues la iluminación de la superficie varía con las fases lunares.

estas zonas habrían recibido impactos menores formando nuevos cráteres sobre el basalto solidificado. Lo anterior explica la existencia de los mares, pero no por qué se encuentran distribuidos principalmente en un hemisferio. Se cree que la corteza era más delgada en el lado visible (unos 60 [km]) que en el invisible (más de 100 [km]). Esta diferencia de grosor habría sido causada por las intensas fuerzas de marea que sufrió la Luna, o podría ser el resultado de una colisión con otro satélite distinto de la Luna, que se habría formado junto a la Luna después de la colisión con la Tierra.

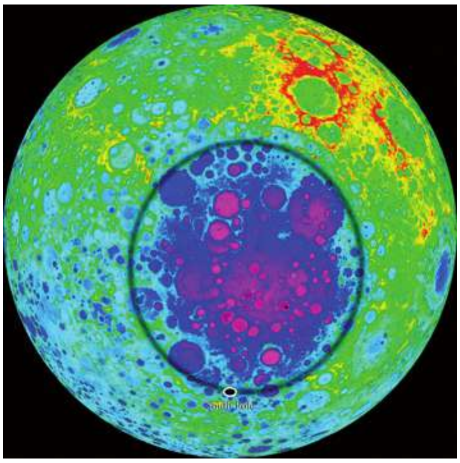


Figura 5.57: Mapa topográfico del polo Sur de la Luna obtenido a partir de los datos de la nave Clementine. Se muestra la cuenca Aitken encerrada en una elipse. La imagen ha sido coloreada para mostrar relieve, el rojo representa mayor altitud y el violeta representa mayor profundidad. Créditos: NASA.

Un gran impacto que no ha formado un mar, ocurrió en una zona no visible de la Luna, es la cuenca *Aitken* (figura 5.57) del polo Sur que posee 2.500 [km] de diámetro y unos 12 [km] de profundidad. Las imágenes de radar de la sonda *Clementine* y los datos del espectrómetro de neutrones de la sonda *Lunar Prospector* indican que la cuenca Aitken contiene depósitos de agua congelada. La Lunar Prospector también descubrió que el polo Norte contendría cerca del doble de hielo que el polo Sur.

La supervivencia de la Luna a este impacto se debería a que fue a baja velocidad y que impactó con un ángulo muy bajo, no mayor de 30° con respecto a la superficie.

Los primeros en llegar a la Luna fueron los soviéticos con el programa *Lunik*, conformado por 24 unidades, lanzadas entre el 2 de enero de 1959 y el 9 de agosto de 1976. Luego de varios intentos fallidos de alunizaje (Lunik 4, 5, 6, 7 y 8) la Lunik 9 tuvo éxito el 31 de enero de 1966. En 1970 la Lunik 16 logró regresar a la Tierra con 101 gramos de basalto lunar. Probablemente uno de los mayores éxitos del programa lunar soviético fue el programa *Lunojod* que consistió en dos robots controlados remotamente, que alunizaron en 1970 y 1973, respectivamente. Lamentablemente tras el lanzamiento de la sonda Lunik 24 en agosto de 1976 el programa Lunik, en el que se integraban estos vehículos de exploración, se dio por concluido no siendo usado el más moderno y mejorado de los robots, el Lunojod 3. Pese al enorme éxito de las misiones soviéticas, la guerra fría y el alunizaje de seres humanos del programa nortemericano *Apollo*, ha hecho prácticamente que quede en el olvido que los soviéticos llegaron antes y exploraron regiones más vastas de la Luna.

El programa Apollo de Estados Unidos consiguió las únicas misiones tripuladas hasta la fecha, comenzando con la primera órbita lunar tripulada por el Apolo 8 en 1968, y seis alunizajes tripulados entre 1969 y 1972, siendo el primero el Apolo 11 en 1969. Estas misiones regresaron con más de 380 [kg] de roca lunar, que han permitido alcanzar una detallada comprensión geológica de los orígenes de la Luna.

El polvo lunar o *regolito* visto en las fotografías y vídeos de las exploraciones lunares se produciría por los innumerables impactos recibidos en la superficie y en la zona de la brusca transición día-noche, que provoca un rápido cambio térmico de varios cientos de grados. Esto produciría que los materiales de la superficie lunar se contraigan y dilaten, fragmentándose reiteradamente hasta convertirse en polvo.

Las misiones Apollo dejaron estaciones sísmicas que han permitido recoger información

acerca del interior de la Luna. La Luna no posee tectónica de placas, sólo existe una actividad tectónica residual debida al enfriamiento y a la acción de las mareas, los lunamotos son causados por impactos de meteoros y objetos artificiales.

El interior lunar es bastante diferente del de la Tierra (figura 5.61); la corteza lunar tiene un espesor de unos 70 [km] en el lado visible a unos 150 [km] en el lado oculto. Debajo de la corteza se encuentra un extenso manto, y bajo éste, se encuentra un núcleo metálico de radio entre 100 y 400 [km]. Es posible que parte del núcleo se encuentre aún parcialmente fundido.

Aunque la Luna no posee un campo magnético global como la Tierra, sí lo tuvo en el pasado. Las rocas lunares están magnetizadas, siendo las más antiguas las que presentan el mayor magnetismo, por lo que que en el pasado el campo magnético fue más intenso.

5.1.8.2. Fobos y Deimos

Fobos y Deimos son los satélites de Marte en orden de distancias. Sus nombres están inspirados en un pasaje del libro XV de La Ilíada, en el cual Ares invoca a Fobos (del griego $\Phi\acute{o}\beta o\varsigma$, pánico, es la raíz de fobia) y a Deimos (del griego $\Delta\varepsilon\acute{\iota}\mu o\varsigma$, terror). En la mitología griega son hijos de Ares y las personificaciones del terror y del horror respectivamente.

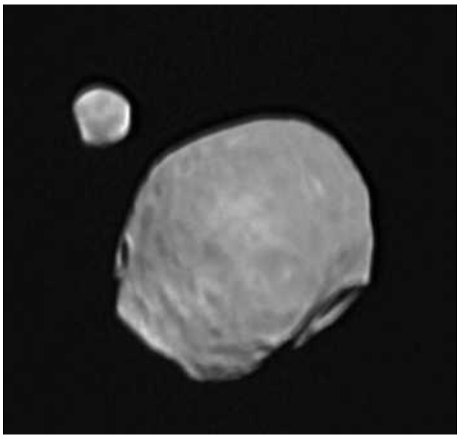


Figura 5.58: Fobos (derecha) y Deimos (izquierda) fotografiados en el mismo campo por la Mars Express. Cuando fueron tomadas las imágenes Fobos estaba a 11.800 [km] de la Mars Express, y Deimos estaba a 26.200 [km]. Créditos: ESA/DLR/FU Berlin (G. Neukum).

Fobos es el satélite más grande de Marte, y el más cercano. Su poca masa no le permitió conseguir forma pseudo esférica, pareciendo en apariencia, como la mayoría de los satélites descubiertos, a un asteroide, sus dimensiones son $27 \times 21,6 \times 18,8$ [km^3]. Su superficie está cubierta por una capa de polvo oscuro de casi un metro de grosor.

Su órbita, a solo 6.000 [km] sobre la superficie, es una espiral que le acerca a Marte progresivamente 1,8 metros por siglo, lo cual llevará que en unos 50 millones de años, las fuerzas de marea terminen por destruir el satélite. Se encuentra tan cerca de la superficie que no puede ser observado desde regiones marcianas con latitudes superiores a 70,4°.

Como es esperable, posee rotación sincrónica, su período órbital es de 11 [h] 6 [min], esto implica que el satélite pasa dos veces por el cielo en un mismo día, lo que causa que salga por el Oeste y se ponga por el Este.

Deimos es el satélite más pequeño y externo, y al igual que Fobos posee forma irregular, sus dimensiones son $15\times12\times10$ [km^3]. Cuando se encuentra en oposición (fase de plenitud) se ve, desde la superficie marciana, similar en brillo a Venus visto desde la Tierra.

Deimos, al igual que Fobos, se compone de roca rica en carbono, muy similar a los asteroides de tipo C (condrita carbonácea). Posee cráteres, pero su superficie es notablemente más lisa que la de Fobos, debido al llenado parcial de sus cráteres con polvo.

Al diferencia de Fobos, Deimos sale por el Este y se pone por el Oeste. Su período orbital es de cerca de 30,5 [h] excediendo en un 25 % al día marciano. Debido a su órbita, que es relativamente cercana a la superficie de Marte y prácticamente ecuatorial, Deimos

no puede ser observado desde regiones marcianas con latitudes superiores a 83,7°.

5.1.8.3. Satélites galileanos

Los cuatro satélites de Júpiter descubiertos por Galileo (ver Volumen I, sección 3.1.2) se denominan galileanos. En orden de distancias son: Io, Europa, Ganímedes y Callisto.

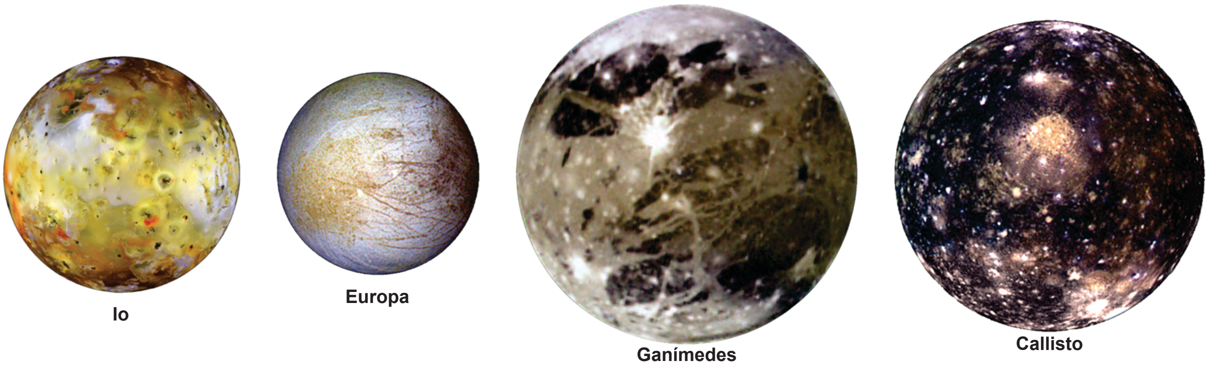


Figura 5.59: Los cuatro satélites galileanos, en orden secuencial Io, Europa, Ganímedes y Callisto. Créditos: NASA/JPL/DLR.

El más cercano, *Io*, es también el satélite más caliente del sistema solar. Su gran proximidad a Júpiter unido a la gran masa de este planeta, y dado que los períodos de revolución de Io, Europa y Ganímedes esten en resonancia 1:2:4 entre ellos, hacen que la acción periódica (cada 84 [h] y 168 [h]) de las mareas tensione el interior de Io, produciendo el calentamiento de su interior. El lado que permanentemente apunta a Júpiter, se encuentra levantado 9,6 [km], y frecuentemente el resto de su superficie sube y baja varias decenas de metros producto de las mareas producidas por los otros satélites galileanos. Debido a lo anterior, Io presenta actividad volcánica permanente.

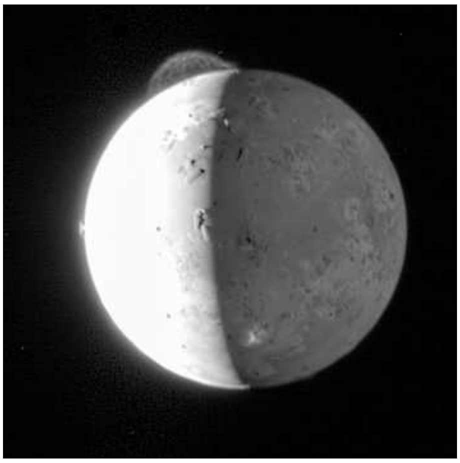


Figura 5.60: Erupción del volcán Tvashtar, el material alcanza una altura de 290 [km] sobre la superficie de Io, tomada por la nave espacial New Horizons. Créditos: NASA/Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory/Southwest Research Institute.

Sus más de 300 volcanes activos producen más de 45.000 toneladas de lava por segundo. El volcán más grande de todo el sistema solar y el flujo de lava más extenso se encuentran en este satélite. Flujos de gases sublimados[27] por la lava volcánica se elevan hasta 400 [km] de altura, posteriormente caen sobre el satélite en forma de nieve, pero nieve de azufre lo que explica la diversidad de colores de la superficie. La temperatura de la lava es probablemente la más caliente del sistema solar, unos 1.350 °C un par de cientos de grados más alto que las temperaturas de la lava terrestre. En la Tierra hace varios miles de millones de años que la lava dejó de ser tan caliente. Estudiar la lava de Io permite entender mejor las condiciones que tenía la actividad volcánica en la Tierra primigenia. El gas de dióxido de azufre expulsado por los volcanes al ser golpeado por las partículas cargadas provenientes del Sol produce fenomenos de auroras permanentes en las cercanías de los volcanes.

[27]La sublimación es el cambio del estado sólido al gaseoso.

Europa es el menor de los satélites galileanos, y en contrase con Io, está cubierto por hielo. La temperatura de la superficie de Europa es de -163 °C en el ecuador y de solo -223 °C en los polos. El poco relieve y las líneas visibles en la superficie hacen suponer que bajo la superficie helada hay un océano líquido que se mantiene caliente por el calor generado por las fuerzas de mareas.

Se estima que la corteza de hielo sólido tiene un espesor aproximado entre 10 y 30 [km]. La serie de franjas oscuras con franjas centrales de material más claro que cruzan la superficie tienen hasta 20 [km] de longitud. Estas corresponderían a grietas en el hielo, que al ser desplazadas de su posición original, son rellenadas por material líquido que asciende y se solidifica.

Los datos proporcionados por la sonda Galileo muestran que Europa crea un campo magnético a causa de la interacción con el campo magnético de Júpiter, lo que corrobora la posible presencia de una capa de fluido, posiblemente un océano líquido de agua salada. Puede que también tenga un pequeño núcleo metálico de hierro.

Las fuerzas de marea producen que Europa presente siempre la misma cara a Júpiter, esta cara estaría levantada hasta 30 metros entre la marea alta y baja. El movimiento de rotación sincrónica es de 3,55 días terrestres. Las distribuciones y formas de las fracturas parecerían mostrar el ralentizamiento de la rotación del satélite.

Observaciones del telescopio espacial Hubble indican que Europa tiene una atmósfera muy tenue (10^{-11} bares de presión en la superficie) compuesta de oxígeno. A diferencia del oxígeno de la atmósfera terrestre, el de la atmósfera de Europa es casi con toda seguridad de origen no biológico. Se generaría por la radiación solar y las partículas cargadas que chocan con la superficie helada de Europa, produciendo vapor de agua que es posteriormente fotodisociado en hidrógeno y oxígeno. El hidrógeno consigue escapar de la gravedad de Europa, pero no así el oxígeno.

Ganímedes es el satélite más grande del sistema solar y de mayor tamaño que Mercurio, aunque sólo posee la mitad de su masa. Debido a su gran tamaño, es mayor que los planetas enanos, tales como Plutón, Caronte y Ceres.

Ganímedes está compuesto probablemente de un núcleo rocoso y/o metálico con un manto de hielo y silicatos, que puede contener una capa de agua líquida y una corteza de roca y hielo. Su baja densidad (1,94 [g/cm^3]), indica que el núcleo ocupa cerca del 50 % del diámetro del satélite.

En la superficie de Ganímedes se distinguen dos tipos de zonas: las regiones oscuras que poseen un gran número de cráteres lo que indica un origen antiguo, y las regiones claras atravesadas por cordilleras y depresiones posiblemente de origen tectónico que se elevan varios cientos de metros de altura y se extienden miles de kilómetros. Esto hace suponer que al igual que en la Tierra, la corteza de Ganímedes está dividida en placas tectónicas, que pudieron moverse independientemente y actuar a lo largo de zonas de la fractura, lo que explicaría las cordilleras observadas. Se han también observado flujos de lava solidificada en su superficie.

El telescopio espacial Hubble ha encontrado evidencias de ozono en Ganímedes, su origen se debería a partículas cargadas atrapadas en el poderoso campo magnético de Júpiter, tal como los cinturones de Van Allen de la Tierra. Esto hace suponer que en Ganímedes debería existir una tenue atmósfera de oxígeno, cuyo origen sería similar al de Europa.

Los datos obtenidos por la sonda Galileo mostraron la existencia de una magnetósfera que podría originarse de un modo similar a la magnetósfera terrestre, producto de

corrientes convectivas de material conductor en su interior.

Calisto es el tercer satélite más grande del sistema solar, con casi el mismo tamaño que Mercurio. Se caracteriza por estar cubierto de una gran densidad de cráteres de impacto, la mayor cantidad de todo el sistema solar. El mayor de ellos *Valhalla* posee una región central luminosa de unos 600 kilómetros de diámetro y anillos concéntricos que se extienden hasta unos 2000 kilómetros del centro.

Calisto es el menos denso de los satélites galileanos, 1,8 [g/cm^3]. Los datos de la sonda Galileo, indican que Calisto posee una corteza de unos 200 [km] de grosor, bajo la corteza es posible que exista un océano salado de más de 10 [km] de grosor. Bajo este océano, se encuentra un inusual interior que no es del todo uniforme, compuesto por roca y hielo comprimido, incrementándose el porcentaje de rocas con la profundidad. Los impactos meteóricos han perforado la corteza de Calisto, causando que el agua se extienda por la superficie, originando los rayos brillantes y los anillos alrededor de los cráteres. Calisto no tiene atmósfera conocida.



Figura 5.61: Modelos del interior de los mayores satélites y de algunos planetas enanos. Observe que los modelos muestran que corresponden a un misma familia de cuerpos. Adaptación de figura original de Doug Ellison, Emily Lakdawalla & Bob Pappalardo.

5.1.8.4. Titán

Titán es el satélite más grande de Saturno y el segundo satélite más grande del sistema solar. Además es el único satélite del sistema solar que cuenta con una atmósfera significativa.

Las distintas capas que componen la atmósfera de Titán son:

- *Tropósfera:* 0 - 40 [km]
- *Estratósfera:* 50 - 225 [km]
- *Termósfera:* 300 - 500 [km]

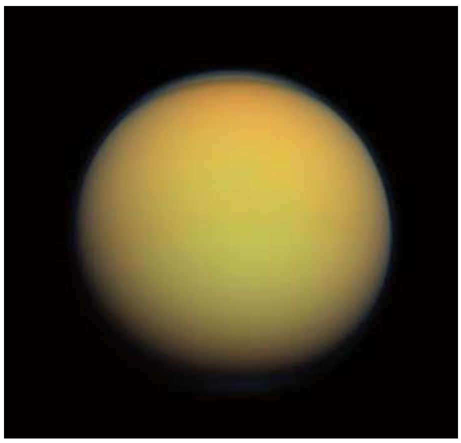


Figura 5.62: Titán el satélite más grande de Saturno. Créditos: NASA/JPL-Caltech/Space Science Institute.

La atmósfera de Titán es muy extensa, llegando incluso a los 975 [km]. Al igual que la Tierra, Titán tiene una estratósfera bien definida, que alcanza altitudes de hasta $\sim$ 225 [km]. En la mesósfera, los perfiles de temperatura muestran una gran variabilidad, posiblemente debido a la influencia de ondas que se propagan verticalmente.

Desde la estratósfera, la fotodisociación del metano hace que el etano (C_2H_6) aumente lentamente con la altitud.

La densa niebla anaranjada producida por la fotodisociación, absorbe la radiación visible, permitiendo sólo a un 10 por ciento de la luz alcanzar la superficie. La neblina es también ineficiente para retener la energía infrarroja (termal), por lo que, a pesar que Titán tiene una atmósfera más densa que la Tierra, el efecto invernadero es más débil.

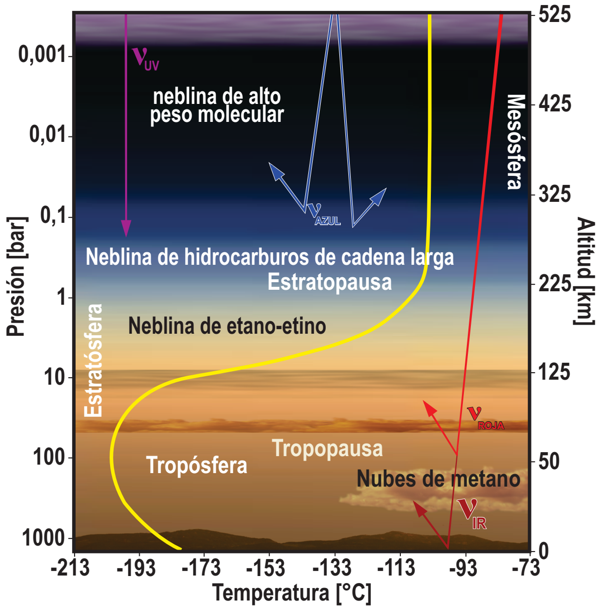


Figura 5.63: Estructura de la atmósfera de Titán. La curva representa la temperatura versus la altura.

La determinación de la estratósfera y la mesosfera se hace a través de ocultaciones estelares y/o de sondas tanto en el infrarrojo como en ondas de radio, sin embargo, la temperatura y ubicación de la estratopausa son determinados por la variación vertical del calentamiento de aerosoles, la refrigeración infrarroja al espacio del etano, y, en menor medida, el calentamiento del metano en sus bandas de infrarrojo cercano.

Dado que la temperatura en la superficie es próxima al punto triple del metano (-170 °C), Titán puede poseer una hidrósfera estable, y ciclos que le permiten encontrarse en estado líquido y gaseoso.

El metano forma núcleos de condensación, que forman una niebla anaranjada y que alcanzan la baja atmósfera de Titán. Sobre esas partículas crecen gotitas de metano que forman nubes en su atmósfera, que precipitan en forma líquida. La lluvia llena los torrentes con un material negro (hidrocarburos) que fluye por complejas redes de estrechos canales de drenaje que descienden desde las brillantes montañas hasta regiones más bajas llanas y oscuras, formándose lagos, costas e islas muy parecidos a los existentes en la Tierra. El metano se infiltra bajo el suelo de Titán, quedando cañones y lagos secos, dejando la superficie cubierta por restos de materia orgánica, una especie de alquitrán.

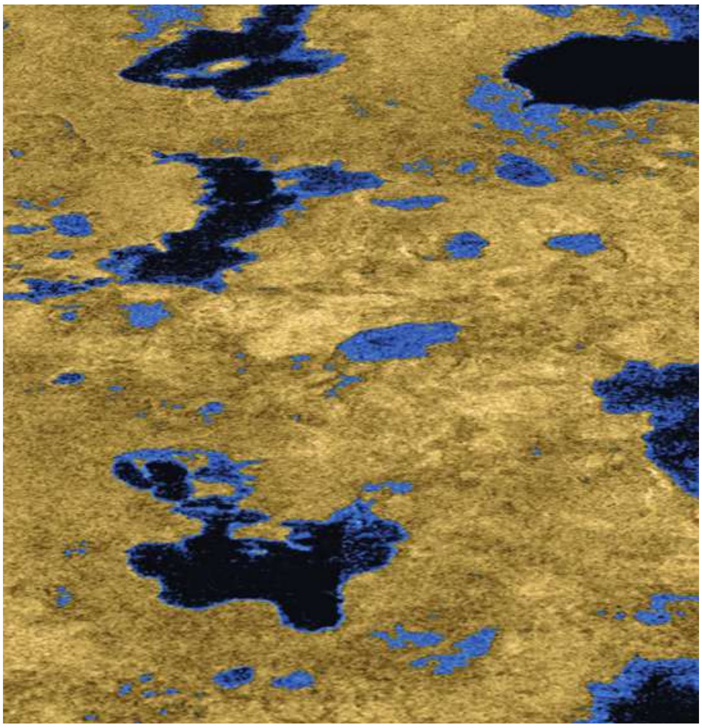


Figura 5.64: Aunque la existencia de océanos y/o lagos de metano líquido fue predicho en los años 80, la confirmación se obtuvo recientemente. En la imagen de radar obtenida por la sonda Cassini el 22 de julio de 2006 se aprecia claramente su existencia. Créditos: NASA/JPL-Caltech/USGS.

Una de las regiones más prolíficas en la formación de extensas masas nubosas ha sido

el polo Sur del satélite, la que se ha encontrado recientemente en verano, por lo que recibía más calor que el resto del planeta, elevando ligeramente las temperaturas y proporcionando la energía para desarrollar episodios tormentosos. Sin embargo, la actividad en el hemisferio Sur, a medida que el equinoccio de Titán se aproximaba (en agosto del 2009), no declinó, por lo que es posible la existencia de ondas en las nubes de las latitudes medias del sur, producidas por las fuerzas de las mareas de Saturno sobre Titán y sus vientos.

La figura 5.65 muestra una visión esquemática del ciclo del metano. Este es liberado a la superficie-atmósfera desde hidrato de clatrato del interior de Titán. Adicionalmente, el metano puede migrar de lagos u mares interpolares (azul). Periódicamente aumenta la humedad ecuatorial hasta el punto de que las tormentas convectivas en las latitudes bajas son posibles (rojo).

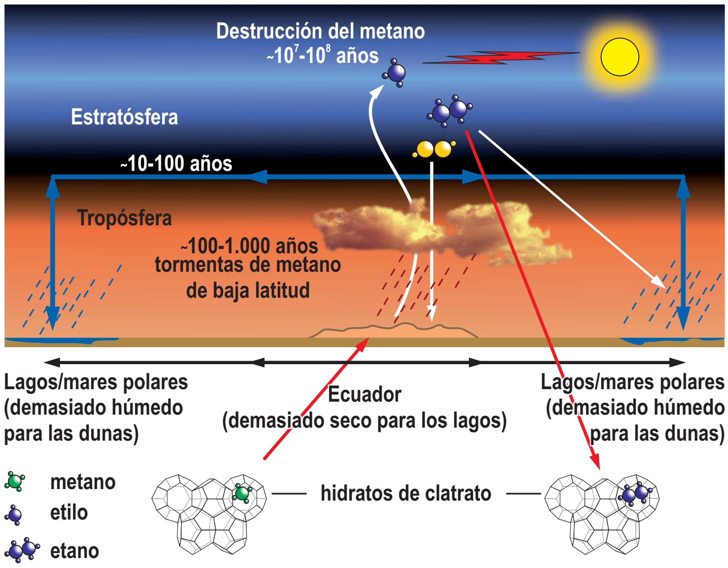


Figura 5.65: Una visión esquemática del ciclo del metano en Titán. Se muestra con escalas de tiempo aproximado para los diversos procesos. Adaptada con el permiso de Macmillan Publishers Ltd: Nature Geoscience 1, 159 © 2008.

La fotoquímica y química de partículas cargadas producen hidrocarburos y nitrilos a gran altura, algunos de los cuales terminan en el sistema hidrológico como el etano (morado), y algunos en forma de sólidos que se aglomeran para formar dunas en el ecuador (naranja). El etano se puede filtrar por huecos en la corteza como hidrato de clatrato.

Titán tiene un período de rotación sincrónico de 16 días y, al igual que Venus, gira lentamente, pero su atmósfera no, ya que posee superrotación. A diferencia de Venus, Titán tiene una gran modulación estacional en sus temperaturas estratosféricas y vientos. La sonda Huygens que descendió en el satélite en enero de 2005, midió la velocidad del viento, encontrando un máximo de 120 [m/s] a unos 120 [km] de altitud. Por debajo de 60 [km], la velocidad del viento disminuyó, y durante los últimos 7 [km] del descenso, Huygens encontró velocidades del viento de sólo unos metros por segundo, llegando a ser en la superficie una suave brisa de sólo 0,3 [m/s]. Los vientos soplan en la dirección de la rotación de Titán, de Oeste a Este, aunque invirtieron su dirección en dos ocasiones: a 6 [km] y a 700 [m] de altitud. Esta información se ha utilizado en simulaciones numéricas para obtener los patrones de vientos globales. Las diferencias de temperatura entre el norte y el sur inducen la formación de una única y gigante célula de Hadley, produciendo circulación de la atmósfera desde el polo estival al polo invernal y viceversa, y es la principal manera en que la atmósfera de Titán distribuye su calor. Los efectos de marea producidos por Saturno deberían influir también en la dinámica.

Titán no genera campo magnético global, sin embargo, dado que su órbita se encuentra al interior de la magnetosfera de Saturno (figura 5.66), posee un leve campo ($M < 2 \cdot 10^{21}$ [Gauss cm^3])[28].

[28] $M_{Tierra} \sim 7{,}9 \cdot 10^{25}$ [Gauss cm^3].

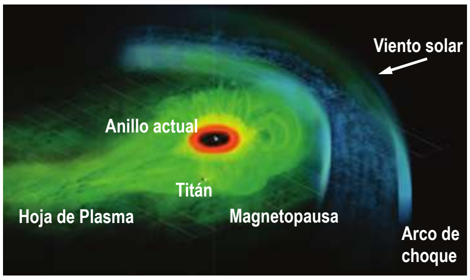


Figura 5.66: La órbita de Titán se encuentra inmersa al interior de la magnetosfera de Saturno. Créditos: NASA/JPL/JHUAPL.

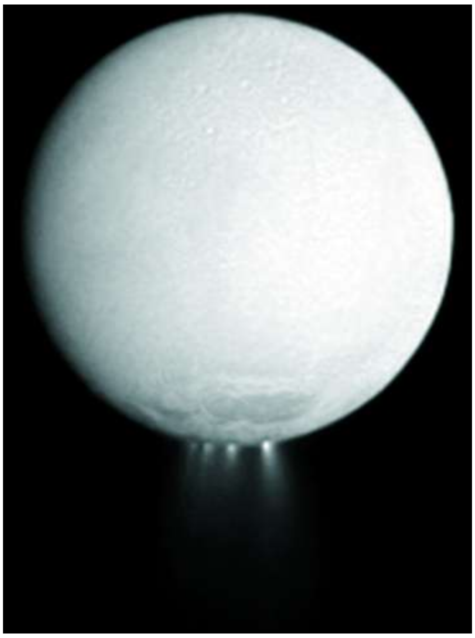


Figura 5.67: Chorros de material helado expulsado de las cercanías del polo sur del satélite. Créditos: NASA/JPL/Space Science Institute.

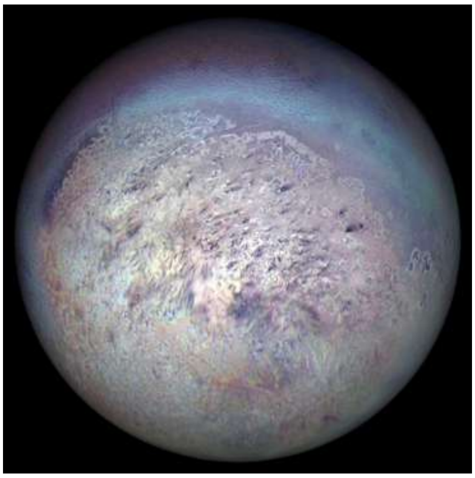


Figura 5.68: Mosaico de Tritón obtenido en 1989 por la sonda Voyager 2. Créditos: NASA/JPL.

5.1.8.5. Encelado

Encelado es satélite de Saturno. Su superficie está cubierta de hielo y muestra vastas regiones descraterizadas, por lo que dichas regiones son jóvenes, lo que es un claro indicador de actividad geológica. La superficie está llena de fracturas revelando actividad tectónica. La sonda Cassini evidenció, en fracturas cercanas al polo sur, mayor temperatura y emisión de chorros de partículas heladas (figura 5.67), algunas de las cuales caen en la superficie y las otras que escapan forman el anillo E de Saturno (figura 5.44).

Dado que su diámetro es solo de 500 [km] ya debería haberse enfriado, por lo que el calor no debería ser producido por sí mismo.

Las mediciones gravimétricas indican que el satélite posee un núcleo rocoso que estaría envuelto por un manto de agua helada de varias decenas de kilómetros de espesor que sería mantenido por las fuerzas de marea y la resonancia orbital con Dione, un satélite más externo de Saturno, que provocaría que ésta tenga una órbita excéntrica. Una posible explicación a la actividad tectónica y al criovulcanismo sería entonces el calentamiento mareal.

Las mediciones de la Cassini de los gases atmosféricos, indican que están compuestos por vapor de agua, nitrógeno, dióxido de carbono y metano y trazas de cianuro de hidrógeno, acetileno, etano, propano, benceno, formaldehído, y otros compuestos orgánicos.

5.1.8.6. Tritón

Tritón es el satélite más grande de Neptuno, dada su lejanía, las temperaturas son extremadamente bajas (~ -240 °C).

Su superficie está cubierta de hielo, sin embargo, en algunas regiones, los hielos cercanos a la superficie sólida son derretidos, lo que permite fluir, a presiones altísimas, nitrógeno hirviente a la superficie, formando géiseres de nitrógeno líquido. El nitrógeno sale a velocidades supersónicas, unas diez veces la velocidad promedio de los geiseres terrestres. Los flujos de nitrógeno se elevan a unos 8 [km] (casi la altura del monte Everest) y probablemente son oscurecidos al ser contaminados por hidrocarburos.

El descubrimiento de estos géiseres amplió el vulcanismo a los cuerpos gélidos, pues para que haya actividad geológica basta un medio fluido, sea roca fundida, nitrógeno o agua.

Tritón tiene un tamaño y composición semejantes a Plutón, y dado que la órbita excéntrica de Plutón atraviesa la de Neptuno, se ha planteado la hipótesis que Tritón haya sido un plutino (Tabla 5.3) capturado por Neptuno. Esto explicaría la gran inclinación de su órbita (157°) con respecto al ecuador de Neptuno, por lo que la traslación de este satélite es retrógrada con respecto a la rotación del planeta.

Se cree que bajo el hielo brillante de Tritón se encuentra un manto de hielo de agua que debe cubrir un núcleo de roca y metales. Este núcleo debe ser muy masivo, unos dos tercios de la masa total de Tritón. La diferenciación puede haber sido eficiente debido al efecto gravitacional de Neptuno durante la captura. Tritón tiene una densidad media de 2,05 [g/cm^3], y está compuesto por cerca de un 25 % de hielo de agua, esencialmente localizado en el manto.

La superficie está compuesta principalmente por hielo de nitrógeno, pero también de dióxido de carbono congelado, hielo de agua y hielo de monóxido de carbono y metano.

5.1.9. Cuerpos menores

5.1.9.1. Asteroides

Los asteroides (del griego *ἀστεροειδής* que significa "figura de estrella") son cuerpos menores de forma irregular, rocosos y metálicos, concentrados mayoritariamente en el cinturón de asteroides. Sus órbitas están entre 2,3 y 2,8 [UA] entre las órbitas de Marte y Júpiter y sus períodos de revolución están entre 3,6 y 4,6 [a]. Sus tamaños van desde muy pequeños; tanto como pequeños granos, hasta los mayores, de varios kilómetros de diámetro. Los miles de millones de componentes poseen en total, cerca de 0,0001 veces la masa de la Tierra.

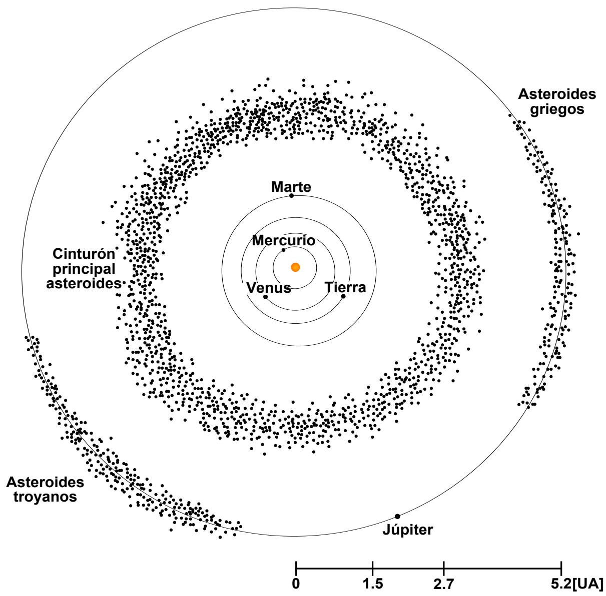


Figura 5.69: El cinturón de asteroides y las órbitas de los principales asteroides que atraviesan las órbitas planetarias. Adaptación de figura original de Lunar and Planetary Institute.

Existen algunos pequeños asteroides con períodos de 12 años, exactamente igual al período de Júpiter, y denominados con nombres de héroes de la guerra de Troya (Aquiles, Héctor, Patroklus, Nestor, etc.), por ello se les conoce como los asteroides *troyanos*. Sus órbitas son estables pues se encuentran en los dos puntos estables, producto de la gravedad combinada del Sol y Júpiter, los denominados puntos L4 y L5. L en honor a *Lagrange*, quien predijo la existencia de estos dos puntos ubicados a ±60° de Júpiter. Realmente los asteroides pueden oscilar en torno a dichos puntos. Estas oscilaciones son denominadas *libraciones*. En principio cualquier planeta puede tener asteroides troyanos en su órbita, por ejemplo el asteroide *(5261) Eureka* ocupa el punto L5 del sistema Sol-Marte, los asteriodes *2004 UP$_{10}$* y *2001 QR$_{322}$* ocupan los puntos L4 y L5 del sistema Sol-Neptuno.

Existen algunos asteroides que orbitan entre los planetas:

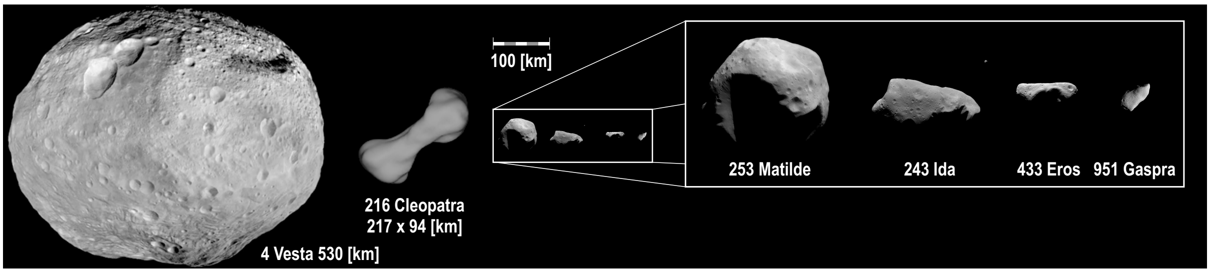


Figura 5.70: Algunos de los mayores asteroides fotografiados por misiones espaciales. Créditos Vesta: NASA/JPL-Caltech/UCLA/MPS/DLR/IDA, créditos Cleopatra: Stephen Ostro et al. (JPL), Arecibo Radio Telescope, NSF, NASA, créditos Matilde: NASA/JPL/JHUAPL, créditos Ida: NASA/JPL, créditos Eros: NASA/NEAR-Shoemaker, créditos Gaspra: The Galileo Project, NASA.

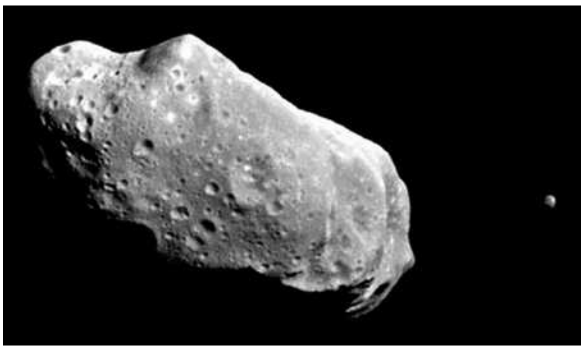
Los *Centauros*, con distancias medias al Sol entre 13 y 25 [UA] lo que sitúa a varios de ellos más allá de la órbita de Urano. Por ejemplo el asteroide *(2060) Quirón* (el centauro de la constelación de Centaurus) orbita entre Saturno y Urano. Tiene un diámetro de 200 kilómetros; su órbita es elíptica lo cual le permite acercarse a Saturno en su perihelio y a Urano en su afelio.

Los *Apolo* cruzan la órbita de la Tierra. Se denominan así pues el perihelio del asteroide Apolo es menor a 1 [UA].

Los *Amor* se mantienen entre las órbitas de la Tierra y Marte (entre 1 y 1,3 [UA]). Eros, el más destacable de este grupo (de ahí el nombre del grupo de asteroides), en su perihelio se acerca más al Sol que Marte en su perihelio. En la oposición 1900 - 1901 llegó a 0,27 [UA] de la Tierra, y en la oposición de 1930 - 1931 llegó a tan sólo 0,17 [UA]. Su paralaje geocéntrica es muy útil para medir la *paralaje solar*.

Los grupos Amor, Apolo y Atón, forman parte de aquellos que sus órbitas los llevan a pasar muy cerca de la Tierra, por ello son denominados *asteroides cercanos a la Tierra* (NEOs, de sus siglas en inglés).

En 1989 un asteroide tipo Apolo pasó a 800.000 [km] de la Tierra. En 1992 el asteroide Toutatis pasó a sólo 4 millones de kilómetros de la Tierra. En 1993 el astrónomo planetario Tom Gehrels encontró otro, de 10 [km] de diámetro, que pasó a sólo 140.000 [km], menos de la mitad de la distancia a la Luna. Se estima que puede ocurrir una colisión con la



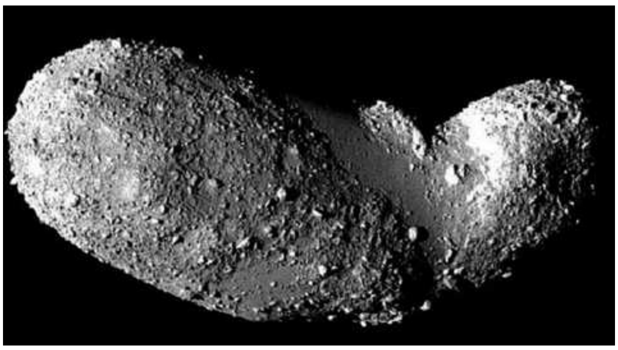


Figura 5.71: (Izquierda) Asteroide 243 Ida, el punto luminoso a la derecha es su satélite asteroidal Dactyl. Se puede observar su forma irregular y una gran cantidad de cráteres de impacto. Créditos: NASA/JPL.

Figura 5.72: (Derecha) Imagen del asteroide Itokawa obtenidas por la sonda japonesa Hayabusa. Se observa una superficie carente de cráteres, aparentemente el asteroide corresponde a un montón de escombros (rocas y pedazos de hielo) que se mantienen más o menos juntos por una pequeña cantidad de gravedad. Los cráteres podrían ser rellenados cuando el asteroide se aproxima a la Tierra. Créditos: ISAS, JAXA.

Tierra cada millón de años.

Los asteroides se clasifican en tres tipos:

- Los *tipo C* o *carbonáceos*, compuestos de un elevado porcentaje de carbono, por lo que son opacos. Son muy comunes (son el 75 % de los asteroides conocidos), y se encuentran principalmente en la parte exterior del cinturón.

- Los *tipo S*, compuestos de silicatos mezclados con metales. Son medianamente brillantes, relativamente comunes, aproximadamente el 17 % de los asteroides conocidos, y se encuentran principalmente en la parte interior del cinturón.

- Los *tipo M*, compuestos de metales, níquel y hierro. Son muy brillantes, gran parte del resto de asteroides son de este tipo.

Hay otros grupos de asteroides raros; los tipo D, tipo T, tipo E, tipo R, tipo V.

5.1.9.2. Objetos del cinturón de Kuiper

Desde la década de 1990 se han descubierto cuerpos menores en órbitas estables más allá de la órbita de Neptuno con distancias medias al Sol entre 40 y 45 [UA]. Estos han sido llamados *objetos trans-neptunianos* (TNOs, de sus siglas en inglés). Se estima que existen 35.000 objetos como ellos, con órbitas entre 30 y 50 [UA], conformando el denominado *cinturón de Kuiper*. Gran parte de los planetas enanos se encuentran en el cinturón de Kuiper.

Más allá del cinturón de Kuiper se encuentra otra zona también compuesta por cuerpos menores y que rodea a todo el sistema solar, denominada *nube de Oort*, en honor del astrónomo *Jan Hendrick Oort* (1900 - 1992).

Objeto	a [UA]	e	i [grados]	q [UA]	Q [UA]
1996 TP66	39,71	0,34	5,07	26,38	53,05
1993 SZ4	39,82	0,26	4,07	29,57	50,07
1996 RR20	40,05	0,19	5,03	32,55	47,55
1993 SB	39,55	0,32	1,09	26,91	52,18
1993 SC	39,88	0,19	5,02	32,24	47,52
1993 RO	39,61	0,20	3,07	31,48	47,73
1993 RP	39,33	0,11	2,08	35,00	43,66
1994 JR1	39,43	0,12	3,08	34,76	44,11
1994 TB	39,84	0,32	12,01	27,05	52,63
1995 HM5	39,37	0,25	4,08	29,48	49,26
1997 QJ4	39,65	0,22	16,05	30,83	48,47
1995 KK1	39,48	0,19	9,03	38,67	46,98
1995 QZ9	39,77	0,15	19,05	33,70	45,85
1995 YY3	39,39	0,22	0,04	30,70	48,08
1996 TQ66	39,65	0,13	14,06	34,59	44,71
Plutón	39,61	0,25	17,17	29,58	49,30

Tabla 5.3: Algunos objetos transneptúnicos tipo plutinos. Notación: a : semieje mayor, e : excentricidad, i : inclinación de la órbita, q : perihelio y Q : afelio.

Tanto los objetos del cinturón de Kuiper como aquellos de la nube de Oort son de particular importancia, pues su composición química se mantendría inalterada desde su formación y sería prácticamente la misma de la nube solar primitiva. Estos objetos serían remanentes de la formación del sistema solar que no se integraron a ningún cuerpo mayor y que su gran distancia al Sol los ha hecho permanecer prácticamente inalterados desde entonces.

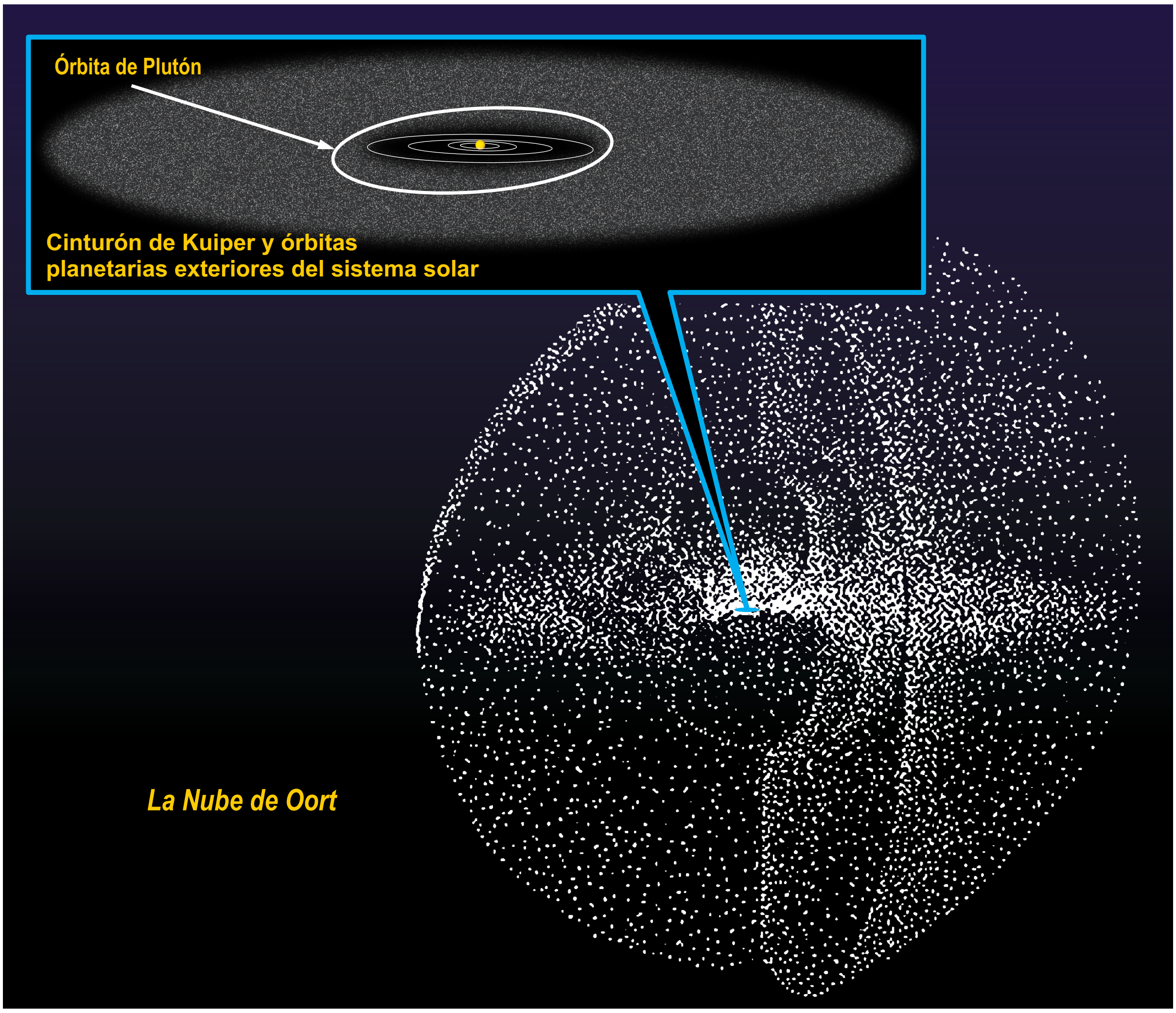


Figura 5.73: El sistema solar exterior, está envuelto por una nube de objetos remanentes de la formación del mismo, la nube de Oort, entre esta y los planetas exteriores se encuentra el cinturón de Kuiper. Figura adaptada de Donald Yeoman (NASA).

5.1.9.3. Cometas

Los cometas (del griego *κομήτης*, y este de *κόμη*, cabellera), son cuerpos menores provenientes de las regiones periféricas del sistema solar, es decir de la nube de Oort o del cinturón de Kuiper, tal como lo propuso *Gerard Kuiper* (1905 - 1973) para explicar el origen de los cometas de corto período.

Los cometas, a diferencia de los asteroides, están compuestos principalmente de hielos de metano y amoníaco, además de hielo de agua. Cuando un cometa, se aproxima al Sol, a una distancia entre 10 y 5 [UA], la radiación del Sol sublima el hielo superficial, formando una atmósfera de gas y polvo que envuelve al núcleo, llamada *coma*. A medida que se acerca al Sol, el viento solar azota la coma produciendo una cola de gas ionizado en dirección contraria de la radiación solar, mientras que el polvo retiene parte de la inercia orbital, formando una segunda cola entre la cola principal y la trayectoria del cometa. La colas pueden alcanzar longitudes de cientos de millones de kilómetros, y en ciertas ocasiones pueden ser vista desde la Tierra (figura 5.74).

Cuando la Tierra atraviesa la órbita de un cometa, remanentes de la cola ingresan en la atmósfera, la ignición de estos produce las famosas *estrellas fugaces*, o las *lluvias de*



Figura 5.74: El cometa McNaught fue visible en hemisferio sur en enero de 2007. A la derecha se observa la Luna y Venus. Créditos: ESO/H.H. Heyer.

meteoros.

Los cometas son residuos del sistema solar primigenio, debido a ello, son de vital importancia para poder estudiar el origen de nuestro sistema solar.

El cometa más famoso fue descubierto en 1682 por *Edmund Halley* (1656 - 1742). Halley interesado en corroborar las leyes de Newton, compiló datos de 24 cometas observados entre 1337 y 1698 y calculó sus elementos orbitales para verificar que las órbitas eran cónicas abiertas (hipérbolas o parábolas). Halley calculó sus órbitas y notó que ninguno tenía órbitas hiperbólicas sino parabólicas. Luego intentó ver si algunos de estos cometas podrían ajustarse elípses en vez de parábolas. Usando los datos de Flamsteed, el mejor astrónomo de Inglaterra y director del observatorio de Greenwich, descubrió que el cometa de 1682 parecía tener una órbita cerrada, por lo que el cometa podría ser observado en el futuro, pero también podría haber sido observado en el pasado. En 1695 le hizo saber a Newton de esto y en 1705 publicó *Synopsis of the Astronomy of Comets*, donde dio a conocer una tabla con los 24 cometas. En esta publicación, teniendo en cuenta la similitud de los parámetros orbitales y que estaban separados entre sí por 75 y 76 años, conjeturó que los cometas de los años 1456, 1531, 1607 y 1682 correspondían en realidad a un mismo cometa que debía tener una órbita cerrada con ese período, cuya variación se debería a las perturbaciones gravitacionales sufridas por la acción de los planetas, de esta forma pronosticó la aparición del cometa en el año 1758. Halley murió antes de comprobar su predicción, sin embargo, en su obra póstuma *Astronomical Tables* de 1749, afirmó que los cometas de los años 44 a. de C., 531 y 1106 eran también el cometa de 1682.

Hacia fines de 1758, se esperaba por primera vez en la historia la aparición de un cometa antes de haberlo observado, los astrónomos barrían la esfera celeste en busca del cometa y la gente ilustrada tanto en Europa como en América esperaba poder observar el evento. El 14 de noviembre de 1758 el matemático *Alexis-Claude Clairaut* (1713 - 1765) anunció en la Academia francesa la predicción del paso por el perihelio calculado para

abril de 1759 considerando la influencia de Júpiter y Saturno con un error estimado de un mes. El cometa pasó por el perihelio el 13 de marzo de 1759, siendo un gran triunfo de la física de Newton y para Clairaut y su grupo de colaboradores.

El paso de 1986 del cometa Halley permitió que varias sondas atravesaran su cola. La nave Giotto fotografió el núcleo del cometa (figura 5.75). Se observó una estructura de 15 [km] de longitud con emisiones de gas sublimado por la radiación del Sol. En la superficie del cometa hay cráteres de impacto, así como grietas causadas recientemente por la radiación solar. Su composición es casi un 33 % de arcilla, 33 % de hidrocarburos y 33 % de diversos tipos de hielos.



Figura 5.75: Núcleo del cometa Halley fotografiado por la nave espacial Giotto en 1986. Créditos: ESA/MPS.

En 1821 el matemático y físico alemán *Johann Encke* (1791 - 1865) descubrió el segundo cometa de órbita periódica. El cometa de Encke es el cometa de más corto período conocido, solamente de 3,3 años, y por ende registra el mayor número de apariciones. En la actualidad es un cometa muy tenue para ser visible a simple vista, pues su superficie de hielo ha sido prácticamente sublimada. Todos los años la Tierra pasa por los remanentes de la órbita del cometa Encke cuya inclinación es de 5 grados respecto de la eclíptica produciendo las lluvias meteóricas *beta tauridas*.

El 30 de junio de 1908, la Tierra fue impactada por un objeto cuya trayectoria de impacto terminaba en *Tunguska, Siberia*. La evidencia dejada en los árboles en la zona permiten estimar que un pequeño cometa o un trozo de él con núcleo pétreo, entró con 30° respecto del suelo y 115° respecto del norte, explotando a unos 6 u 8 [km] sobre la superficie, con una energía de unos 15 megatones; mil veces la energía de la bomba de Hiroshima. El perfil de caida de los árboles (figura 5.76), permitió estimar los parámetros orbitales y sumado a la fecha de impacto, resulta posible que el objeto haya pertenecido a la lluvia de meteoros *beta tauridas* asociadas a partículas del cometa Encke.

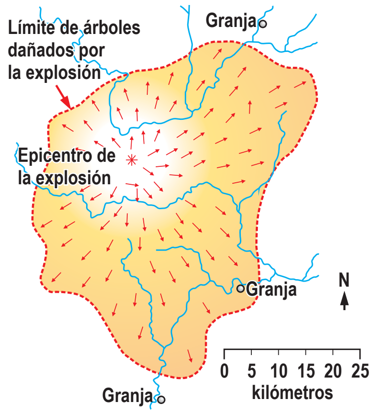


Figura 5.76: El perfil de caida de los árboles de Tunguska.

En 1929 un cometa pasó cerca de Júpiter, y su gravedad modificó la órbita. En julio de 1992, nuevamente pasó por sus proximidades, solo que esta vez fue capturado, quedando en órbita a su alrededor. El cometa fue descubierto en marzo de 1993 por el matrimonio *Carolyn* y *Gene Shoemaker* y el aficionado *David Levy* y fue llamado *Shoemaker-Levy 9* (el número se debe a que fue el noveno que descubrieron conjuntamente). A partir del mismo descubrimiento llamó la atención la curiosa forma alargada con una cola ancha y muy extensa (figura 5.77). Esta forma se debe a la existencia de varios núcleos, cuya estructura asemeja a un collar de perlas. Esta forma se debe a que el cometa fue fragmentado por las fuerzas de marea debidas a

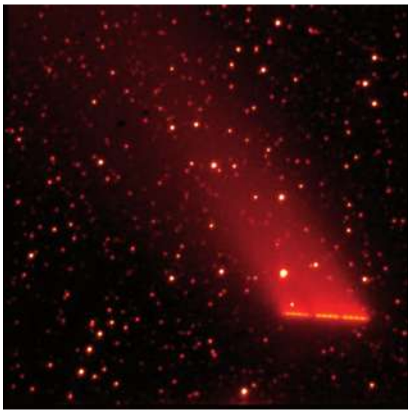


Figura 5.77: Cometa Shoemaker-Levy 9.

Júpiter.

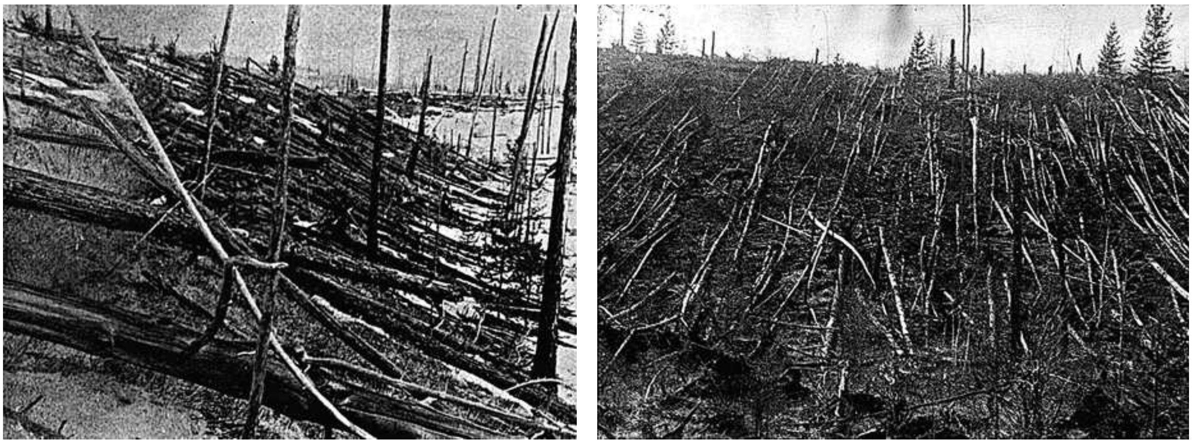


Figura 5.78: Fotografías de la zona de Tunguska tomadas por la expedición de Leonid Kulik.

El cálculo de la órbita resultó algo complicado, debido a que describía un movimiento espiral que finalizaba con el impacto sobre el planeta Júpiter. Todos los fragmentos, unos 21, chocaron con Júpiter[29]. Los trozos de roca, de alrededor de 2 [km] de diámetro, impactaron al planeta gaseoso a una velocidad de 200.000 [km/h].

Los instrumentos astronómicos de todo el mundo (telescopios, radiotelescopios, sondas espaciales, etc.) apuntaron a Júpiter para poder captar el evento. Por ejemplo los instrumentos de la sonda Galileo han fornido un conjunto único de datos de la colisión del Shoemaker-Levy 9 con Júpiter que ocurrió en el lado no visible desde la Tierra.

Los datos de la Galileo indican que los fragmentos no penetraron muy profundamente, ya que poca o nada de agua fue lanzada a la estratósfera de Júpiter. Fragmentos grandes y sólidos, habrían penetrado más profundamente y habrían sacado agua de las húmedas capas atmosféricas. Además su satélite Europa, no reflejó los brillantes destellos en el lado oscuro de Júpiter, como se esperaba, lo que permitió descubrir características únicas de la atmósfera de Júpiter y de este tipo de impactos.

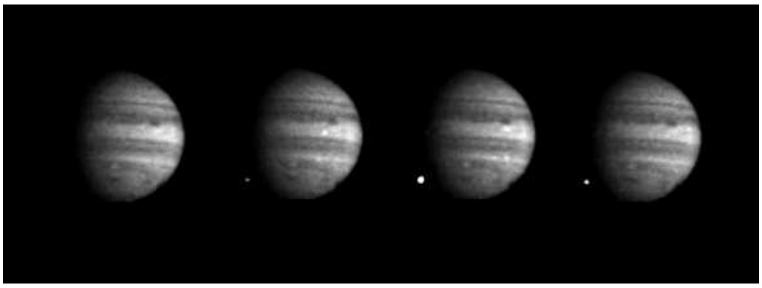


Figura 5.79: Imágenes del impacto del trozo W (el último), obtenidas por la sonda Galileo de la NASA el 22 Julio de 1994. Créditos: NASA, JPL, Galileo Project.

El 18 de Julio de 1994 impactó el fragmento G. Cuando fue inicialmente detectado por instrumentos de la sonda Galileo, la temperatura fue de cerca de 7.600 [K] (mayor que la superficie del Sol). Después de cinco segundos, al ser visible desde la Tierra, se registró la expansión del penacho, su elevación, y enfriamiento, durante un minuto y medio, hasta que tenía cientos de kilómetros de diámetro y sólo 400 [K] (127 °C).

Las inmensas manchas oscuras (figuras 5.80 y 5.81) permanecieron en la atmósfera superior de Júpiter durante meses, o incluso un año en algunas longitudes de onda. Las manchas más grandes tuvieron tamaños mayores que la Tierra.

[29] A veces se piensa en Júpiter como un gran protector del sistema solar interior, debido a que puede atraer, producto de su intensa gravedad, un número importante de cometas, sin embargo, también puede aumentar el número de éstos en esta zona debido a que modifica sus órbitas, aumentando la frecuencia con que pasan entre los planetas interiores.

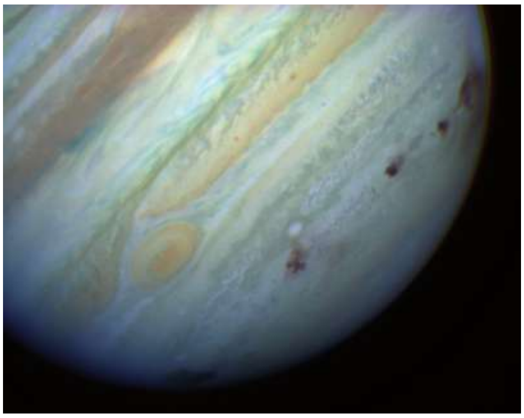



Figura 5.80: Izquierda: Onda producida por el impacto del trozo G. Créditos: HST-NASA.

Figura 5.81: Derecha: Remanentes de varios impactos del cometa Shoemaker-Levy 9 sobre el planeta Júpiter. Créditos: HST-NASA.

5.2. Formación del sistema solar

Como ya sabemos, el espacio interestelar está poblado de grandes cantidades de gas y polvo conocido como *nubes moleculares*. En las nubes moleculares el gas y el polvo están íntimamente relacionados. Este gas, muy frío, no es observable en el visible, pero dado que el polvo absorbe la radiación (polvo denso), emite por calentamiento (emisión térmica).

En ciertas zonas más densas, llamadas núcleos, si la gravedad logra supremacía sobre otros efectos que tienden a mantener separado al gas (la presión del gas, la de radiación, las turbulencias, el campo magnético, etc.) se inician los procesos de aglutinación. Si este proceso tarda menos que el tiempo que el material nebular en dispersarse (por ejemplo por el movimiento galáctico) se dará inicio al proceso de formación estelar.

La nube durante el proceso de contracción, se fragmenta, los núcleos continuan su contracción gracias a la atracción gravitacional de éstos, convirtiéndose, cuando alcanza la forma esferoidal, en una *protoestrella*. El resto del material, esencialmente hidrógeno y helio, paulatinamente adquiere forma de disco, que rota en torno de la protoestrella. Este disco de acreción es denominado *disco protoplanetario*.





Figura 5.82: Imágenes obtenidas por el telescopio espacial Hubble de una pequeña porción de la nebulosa de Orión. A la izquierda se observa que cuatro de las cinco jóvenes estrellas están rodeadas de gas y polvo en órbita alrededor de la estrella. Al centro se observa un disco protoplanetario de frente y a la derecha se observa uno de perfil. En este último caso, la estrella está oculta al interior del disco. En estos discos protoplanetarios podrían formarse planetas. Créditos: Mark McCaughrean/Max-Planck-Institute for Astronomy, C. Robert O'Dell/Rice University & NASA.

Todas las estrellas se forman de esta misma manera, formándose en su entorno discos, solo que las protoestrellas más masivas se convierten en estrellas muy rápidamente y la presión de la radiación expulsa el disco.

La *teoría nebular* propone que el sistema solar se formó hace unos 4.600 millones de años a partir del disco de acreción de gas y polvo que existía en torno del naciente Sol. Su diámetro debía ser de unas veinte veces el del actual sistema solar. De esta forma la formación de las estrellas y los planetas serían etapas distintas de un mismo proceso, y por ende, la teoría predice que los planetas deberían formarse también en torno de otras estrellas.

La composición química del disco protoplanetario es similar a la de la nebulosa, y para el caso del sistema solar podemos conocerla a través de los materiales de que está compuesto el Sol: un 73 % de hidrógeno, 25 % de helio, 0,8 % de oxígeno, 0,3 % de carbono, 0,1 % de neón y nitrógeno, 0,07 % de silicio, 0,05 % de magnesio y 0,04 % de azufre. Estos elementos se encontraban también formando moléculas tales como hidrógeno molecular (H_2), hielos de agua (H_2O), metano (CH_4), amoníaco (NH_3), dióxido y monóxido de carbono (CO_2 y CO). En las regiones más internas del disco, el polvo se vaporiza, mientras que en las regiones más externas sobreviven y crecen a medida que los gases condensan sobre ellos. Las estrellas más jóvenes poseen discos ricos en gases mientras que las menos jóvenes tienen discos pobres en gas. Esto nos muestra que la presión de radiación de estrellas jóvenes (o por vecinas brillantes) expulsan el gas del disco durante los primeros millones de años.

Los granos de polvo colisionan entre si y se rompen o se adhieren lo que produce una distribución de tamaños. El gas no se mueve de la misma forma que un grano de polvo que es más compacto. Cuando los granos alcanzan tamaños del orden de algunos milímetros, éstos se mueven más rápido que el gas circundante produciéndose fricción que hace que los granos pierdan energía y se muevan en órbitas espirales. Los granos más grandes caen más rápido en espiral que los más pequeños, produciéndose así una migración de los granos a regiones más internas del disco, pero hacia el interior la temperatura aumenta, produciéndo que los hielos sublimen. Existe un límite que divide el disco en dos regiones, una interior bajo la cual los hielos no pueden existir, y en la zona externa a ella en que sí pueden existir, este límite se denomina *línea de los hielos*. En el sistema solar esta se encuentra un poco antes que la órbita de Júpiter (figura 5.83).

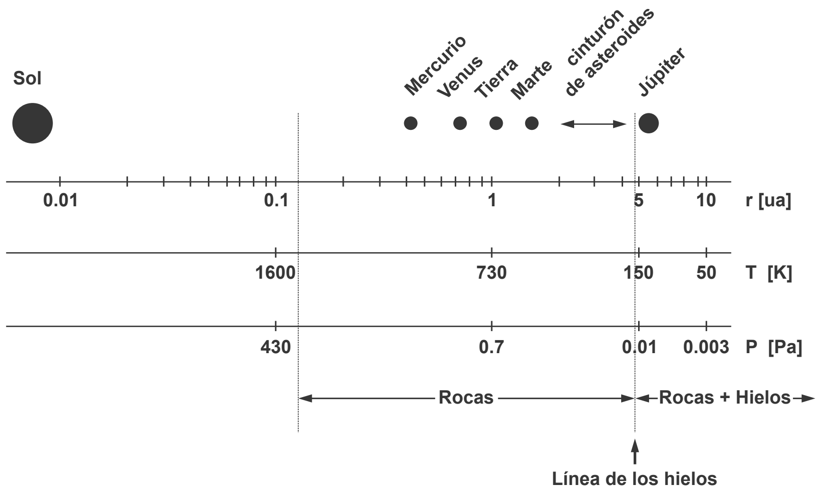


Figura 5.83: Simulación numérica de un disco protoplanetario típico donde se observan zonas limitadas por la línea de los hielos. Se ha superpuesto el sistema solar. Notación: r : distancia al Sol en [UA], T : Temperatura en Kelvin y P : presión en pascales. Adaptación de figura original de Caroline Terquem.

En la línea de los hielos ocurre una acumulación de agua que produce un aumento de la presión en la región, que causa que el gas en dicha región interior a la línea de los

hielos acelere. El gas ahora empuja a los granos hacia la región exterior en vez de frenarlos, pero dado que en la región exterior éstos están migrando hacia el interior, se produce una acumulación de grandes granos justamente en la región de la línea de los hielos, lo que propicia las colisiones y adherencia de los granos. Al incrementar sus tamaños, la gravedad comienza a asumir un rol importante, aumentando aún más las colisiones y adherencias. Los granos seguirán creciendo hasta alcanzar tamaños del orden de kilómetros, momento en el cual cambian su nombre a *planetesimales*. Los planetesimales continuarán colisionando entre si, rompiéndose o adhieriéndose. Unos pocos objetos crecen en tamaños, lo que aumenta su adquisición de material, hasta alcanzar el tamaño de la Luna, momento en el cual se producirán importantes perturbaciones en su entorno, lo que dispersará gran parte del material, limitando su crecimiento en tamaño, pese a ello, los *embriones* continúan creciendo, pero cuanto material adquieran, dependerá de la separación entre ellos y de la zona del disco donde se encuentren, pues en donde se acumulen planetesimales, como es el caso de la línea de los hielos, los embriones podrán crecer más. Por ejemplo, si la separación es del orden de 1 [UA] los embriones adquieren masas de 0,1 $M_\oplus$, y si la separación es del orden de 5 [UA] los embriones adquieren masas de 4 $M_\oplus$. Cuando ya la adquisición de masa prácticamente se detiene, los embriones cambian su nombre a *protoplanetas*.

5.2.1. Formación de planetas gigantes

Los planetas exteriores al cinturón de asteroides poseen características muy diferentes a las de los planetas interiores. Esto parece indicar que las condiciones en que se formaron los cuerpos del sistema solar exterior son diferentes a las imperantes en la zona del disco donde se formaron los planetas interiores.

El disco se mueve más lentamente hacia el exterior, por lo cual su temperatura decrece. De esta manera en el exterior la formación de planetas se inicia antes, teniendo más tiempo para acumular material.

Una vez que el protoplaneta alcanza la masa suficiente, está en condiciones de retener además moléculas de gas. Comienza la formación de una capa gaseosa, aquí los gases poseen velocidades promedio, producto de la agitación térmica, inferior a la velocidad de escape.

Mientras el núcleo y la atmósfera del protoplaneta crecen lentamente, la energía radiada por la atmósfera es compensada por la energía liberada por la colisión de planetesimales sobre la superficie. Si el núcleo de protoplaneta alcanza una masa crítica, la energía radiada por la atmósfera deja de ser compensada, esto se compensará ahora con una rápida contracción gravitacional de la atmósfera. Comenzado este proceso la acreción de gas al protoplaneta se acelera, a tal punto, que este proceso llevará a la formación de planetas gigantes gaseosos. Al ser más masivos este tipo de planetas pueden retener también hidrógeno y helio, los que escapan de la gravedad de los planetas menos masivos. Este proceso debió demandar unos pocos millones de años para los planetas Júpiter y Saturno.

La interacción del embrión con el disco, produce que un hemisferio, el que está más cerca de la estrella, sea empujado hacia adelante en su movimiento orbital y que el otro hemisferio, el que está más lejos de la estrella, sea frenado, produciendo que éste caiga en espiral. Este acercamiento del planeta a la estrella es denominado *migración de tipo I.* La migración se detiene cuando el planeta alcanza la línea de los hielos, donde la magnitud de las fuerzas se invierte. Esto podría explicar la cercanía de Júpiter a la línea de los hielos.

El movimiento del protoplaneta hace que el gas de la región en torno del hemisferio

más alejado de la estrella se mueva más rápido, alejándose del planeta mientras hace que el gas de la región más cercana se mueva más lentamente acercándose a la estrella; de esta forma, se genera un hueco en el disco por donde pasa el planeta y si el planeta ha alcanzado una masa crítica, no permitirá que el hueco sea nuevamente rellenado por el gas.

De esta forma, Júpiter sería el primer planeta en formarse en el sistema solar, luego, unos millones de años después, se habría formado Saturno. La formación de Júpiter habría sido fundamental en la formación de los otros planetas gigantes, ya que el hueco que forman en el disco se comporta de la misma forma que lo hace la línea de los hielos, permitiendo que en sus cercanías los planetesimales incrementen sus encuentros y con ello su tasa de incremento de masa. Los planetesimales que se encuentran en las cercanías del hueco, son constantemente expulsados por el gigante en formación, aportando material en regiones del disco donde dicho material estaría ya desapareciendo, permitiendo que el proceso de crecimiento continúe. Este sería el caso de Urano y Neptuno, cuya adquisición de planetesimales fue muy eficiente de forma que los embriones alcanzaron masas del orden de 10 a 20 $M_\oplus$, sin embargo, durante su crecimiento el gas ya no era tan abundante, por lo que no alcanzaron a convertirse en gigantes gaseosos.

La aparición de los nuevos planetas gigantes, producirá perturbaciones gravitacionales sobre los planetas ya formados, lo que producirá que las interacciones entre ellos modifiquen sus órbitas hasta que se encuentre una configuración estable. Este proceso, produce también la expulsión del material del disco hacia otras zonas, el material expulsado por Urano y Neptuno formó el cinturón de Kuiper y el material expulsado por Júpiter formó la nube de Oort, mientras que el material expulsado por Saturno, habría sido expulsado hacia la región interna del sistema solar, produciendo una lluvia de escombros que explicaría el incremento en el número de colisiones denominado el *bombardeo pesado tardío*.

5.2.2. Formación de planetas rocosos

Los planetas rocosos se forman al interior de la línea de los hielos entre los 10 y 100 millones de años. Los embriones que dieron origen a este tipo de planetas tenían masas del orden de 0,1 $M_\oplus$, para seguir creciendo tuvieron que chocar entre sí, en dos posibles escenarios, con o sin la existencia de gas residual.

En el escenario de no existencia de gas residual, los embriones se desestabilizaban entre sí, dando como resultado, luego de unos pocos millones de años, la adquisición de órbitas elípticas que se intersectaban. Para explicar la circularización de las órbitas, podemos suponer la existencia de una importante cantidad de planetesimales, de forma que durante los siguientes 100 millones de años los planetas adquieran una parte y expulsaran otra, transfiriendo a los planetesimales de sus alrededores energía y cantidad de movimiento (momentum), dando como resultado la circularización de las órbitas.

El otro escenario que considera la existencia de gas residual, podría explicar la circularización de las órbitas, el problema es que antes, el mismo gas habría impedido la inestabilidad del sistema, además que las observaciones no apoyan esta hipótesis.

Existe sin embargo un tercer escenario que involucra la intervención de Júpiter. La gravedad de este planeta podría haber hecho migrar los planetas de zonas pobres en gas a otras menos pobres. Esta contribución habría sido más importante en ciertas órbitas resonantes que se fueron desplazando con la migración de Júpiter hacia su actual posición. Esto debió haber empujado a los planetas rocosos a una zona más cercana a la de Mercurio

que la que poseen actualmente.

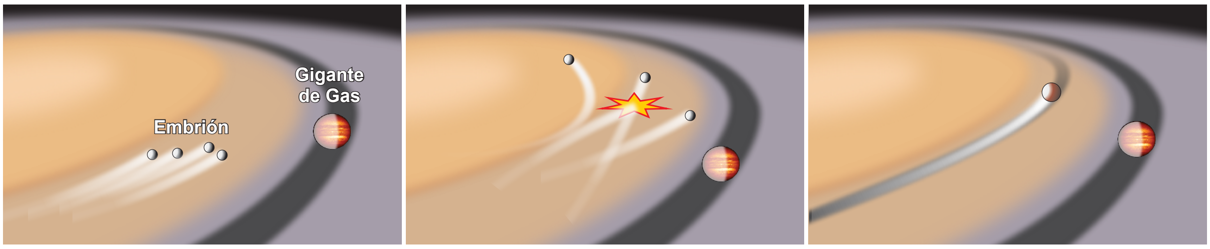


Figura 5.84: Los embriones en movimiento circular (izquierda) son pertubados por la presencia de Júpiter produciendo que sus órbitas se intersecten (centro). Las colisiones dan como resultado un protoplaneta que producto del gas y la adjudicación de planetesimales adquiere una órbita circular estable (derecha). Adaptación de obra artística de Don Dixon/cosmographica.com.

El actual modelo, apoyado de datación isotópica, indica que hace 4 mil millones de años, se habría formado el cinturón de asteriodes, el que no pudo seguir creciendo y formar un protoplaneta, debido a la gravedad de Júpiter. Pese a ello, es posible que algunos de los embriones hayan crecido lo suficiente para que ocurrieran procesos de diferenciación, y posteriores colisiones habrían destruído estos protoplanetas, cuyos restos serían de diferentes materiales, explicando así las diferencias químicas de los distintos tipos de asteroides (tipos C, S, M y los tipos raros). Unos 10 millones de años después se habría formado Marte y unos 50 millones de años después la Tierra (hace unos 4,5 [Ga]).

Si aceptamos la influencia de Júpiter, debemos también aceptar que ocurrió algo que impidió a los planetas rocosos migrar a la órbita de Mercurio, esto puede haber ocurrido debido a grandes colisiones y/o a que alcanzaron tamaños suficientes para que Júpiter dejara de empujarles.

Una de estas grandes colisiones podría explicar la lenta rotación retrógrada de Venus, otra el enorme tamaño del núcleo de Mercurio y otra de estas grandes colisiones ocurrió en algún momento entre 30 y 100 millones de años desde que el Sol comenzó a brillar, un embrión del tamaño de Marte impactó la Tierra primigenia, lo que dió como resultado la Tierra y la Luna actuales.

5.3. Exoplanetas

Los *planetas extrasolares* o *exoplanetas* son aquellos que orbitan en torno a otras estrellas distintas al Sol y, por ende, forman parte de sistemas planetarios distintos del nuestro.

La primera referencia histórica que se conoce acerca de la existencia de otros mundos se remonta a hace más de dos mil años. El filósofo helénico *Epicuro de Samos* (341 a. de C. - 270 a. de C.) en una carta a Heródoto (no el historiador) en la que trata sobre gnoseología[30] y física, expresaba sus creencias de la existencia de otros mundos semejantes al nuestro. En el renacimiento, el filósofo y ex religioso napolitano *Giordano Bruno* (1548 - 1600) en su libro "*Del infinito universo e mondi*", reinterpreta los trabajos de Copérnico indicando que no existe una esfera celeste y que por tanto las estrellas no están equidistantes del centro, asegura también que no hay razón para suponer que los planetas sean solamente siete, sino

[30] La gnoseología (del griego $\gamma\nu\omega\sigma\iota\varsigma$, conocimiento o facultad de conocer, y $\lambda\acute{o}\gamma o\varsigma$, tratado, estudio, ciencia), también llamada teoría del conocimiento, es una rama de la filosofía que estudia la naturaleza, el origen y el alcance del conocimiento.

que son innumerables pero invisibles y giran perpetuamente en torno a los innumerables soles.

Los primeros anuncios de detección de exoplanetas se remontan a mediados del siglo XIX, cuando el Capitán *W. S. Jacob* reporta en 1855 la existencia de un compañero inobservable de la estrella binaria 70 Ophiuchi. En 1899, *Forest Ray Moulton* publica un artículo demostrando la inviabilidad de la presencia de tal planeta. Durante el siglo XX se reportaron otros tantos planetas que posteriormente se descartaron, denominados *falsos positivos*, hasta que en 1992 el astrónomo polaco *Aleksander Wolszczan*, y el radioastrónomo canadiense *Dale Frail*, utilizando el radiotelescopio de Arecibo, observaron ligeras anomalías en el período del púlsar *PSR 1257+12*, situado a unos 1.000 años luz de distancia. Su interpretación fue que el púlsar tenía dos planetas orbitándole, los que producirían ligeras variaciones en el extremadamente preciso período del púlsar. Las variaciones ocurrirían debido a los "tirones" gravitatorios de los planetas, que lo harían oscilar ligeramente, lo que repercute en el período observado. Pese al sorprendente descubrimiento, hubo mucho escepticismo debido a que un año antes otro equipo había anunciado un descubrimiento similar en el púlsar *PSR 1829-10*, pero más tarde se retractaron y por otra parte la existencia de planetas en torno de pulsares no había sido previsto, ya que se esperaba que la explosión de una supernova progenitora de un púlsar, destruyera cualquier posible planeta de la estrella. Los planetas encontrados deberían entonces haberse formado después de la explosión de supernova y la formación del púlsar, o pueden ser los núcleos rocosos de antiguos gigantes gaseosos, cuyas atmósferas habrían sido barridas por la onda de choque de la supernova.

En 1995 los astrónomos *Michel Mayor* y *Didier Queloz* del Observatorio de Ginebra descubrieron el primer planeta extrasolar alrededor de una estrella de secuencia principal, *51 Pegasi* y se le denominó *51 Pegasi b*. 51 Pegasi es una estrella de tipo solar en la constelación de Pegaso a 47,9 años luz del Sol, tiene una magnitud aparente de 5,49 por lo que desde la Tierra es fácilmente visible con binoculares y a simple vista solo en condiciones muy óptimas. El planeta fue descubierto con una técnica denominada método de las velocidades radiales, el cual no permite medir exactamente la masa del planeta, sino que un límite máximo de masa: el producto de la masa del planeta por el seno del ángulo de inclinación orbital (i), el valor obtenido fue $m \sin i = 0{,}468 \pm\ 0{,}007\ [M_J]$[31]. Este valor de masa implica que el planeta es un gigante gaseoso, lo sorprendente fue que el planeta tiene un período orbital de 4,24 [d], por lo cual su órbita posee un semieje mayor de 0,05 [UA], con una baja excentricidad, de esta forma, este planeta está más cerca que Mercurio del Sol.

En realidad el primer exoplaneta fue descubierto en 1988 por los astrónomos canadienses *Bruce Campbell*, *G. A. H. Walker* y *Stephenson Yang*, sin embargo, en el artículo publicado ellos sugieren (y no afirman) que los compañeros de siete estrellas deberían ser planetas y no enanas marrones, indicando que se requería más investigación. Solo en 2003 llegó la confirmación de que uno de esos siete compañeros era un exoplaneta, por lo que muy rara vez son mencionados como los descubridores del primer exoplaneta.

El descubrimiento de 51 Pegasi b constituyó un importante éxito de la investigación astronómica al mostrar a los astrónomos que planetas de tipo gigante podían existir en órbitas cercanas a la estrella. Posteriormente se descubrieron más planetas gigantes con órbitas muy cercanas a sus estrella, a los que se les denominó "*júpiteres calientes*".

A estos ya sorprendentes descubrimientos se sumarían otros también inesperados como

[31] M_J = masas de Júpiter.

planetas orbitando alrededor de enanas marrones. También el descubrimiento de planetas rocosos más masivos que la Tierra, los denominados "*supertierras*". Otro de los descubrimientos inesperados y sorprendentes es la existencia de planetas en torno de estrellas binarias, hay planetas que orbitan a una de las estrellas y otros que orbitan alrededor de las dos estrellas, los llamados *planetas circumbinarios*.

Los planetas extrasolares se denominan usando el nombre de la estrella huésped más una letra minúscula ordenadas alfabeticamente según el orden del descubrimiento del planeta en el sistema planetario, empezando con la letra "b". Las letras mayúsculas (A, B, C, D) son usadas para etiquetar estrellas en un sistema múltiple. Por ejemplo, Tau Boötis Ab es el primer planeta descubierto (por ello la letra b) de la estrella principal (A) del sistema estelar múltiple Tau Boötis.

Los exoplanetas son extremadamente difíciles de encontrar, ya que en general son muy pequeños y poco luminosos comparados con las estrellas a las cuales orbitan. Por ejemplo, la Tierra es mil millones de veces menos brillante que el Sol, por lo que intentar descubir un planeta como la Tierra en torno de una estrella similar al Sol es una tarea que pareciera casi imposible, sin embargo, los astrónomos y astrofísicos han encontrado ingeniosos métodos que permiten descubrirlos principalmente de forma indirecta, ya sea midiendo los efectos que producen sobre la estrella o sobre la luz de otras estrellas.

Los métodos de búsqueda más utilizados son:

1. *Movimiento entorno del centro de masas:* consiste en medir un pequeñísimo movimiento de la estrella debido a la presencia de uno o más planetas. El movimiento de la estrella puede ser detectado de dos maneras:
    a) *Astrometría:* se mide el ínfimo cambio de posición de la estrella respecto de la esfera celeste.
    b) *Velocidad radial:* se mide el desplazamiento de las líneas espectrales debido al movimiento de la estrella, y a través de esto, se obtiene la velocidad de acercamiento y alejamiento de la estrella producto de dicho movimiento.
2. *Fotometría:* se mide el pequeño cambio de brillo de la estrella debido al tránsito y/u ocultación del planeta frente y/o detrás de la estrella.
3. *Microlentes gravitacionales:* se observa un doble aumento de brillo en una estrella, que se produce cuando una invisible estrella con exoplaneta pasa delante de ella, la estrella produce un aumento del brillo y luego, bajo ciertas condiciones, el exoplaneta produce un aumento de brillo secundario.
4. *Detección directa:* consiste en cubrir la luz de la estrella o anular su luz, de forma de poder observar directamente el débil brillo del o los planetas.

El 25 de noviembre de 2012 la "*Enciclopedia de los Planetas Extrasolares*"[32] informa que se ha descubierto 851 planetas candidatos, en 670 sistemas planetarios de los cuales 126 son sistemas planetarios múltiples, es decir, se han descubierto más de un planeta. Dado que este párrafo será el primero de este texto en quedar obsoleto, se recomienta visitar la página web de la Enciclopedia de los Planetas Extrasolares si se quiere conocer los valores actualizados.

[32]http://exoplanet.eu/

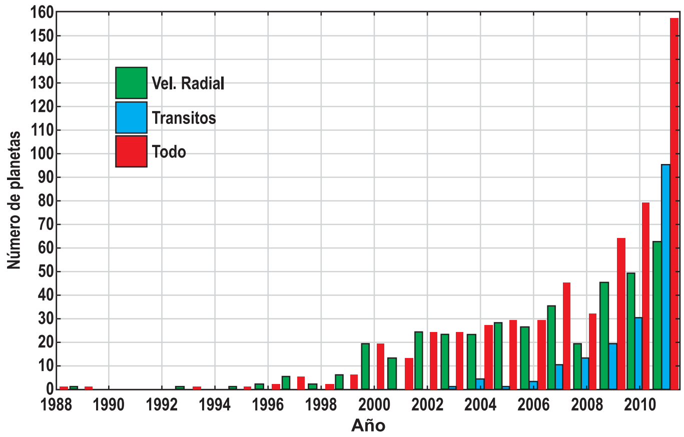


Figura 5.85: Número de exoplanetas descubiertos por año. Observe como en los últimos años el número ha crecido de forma exponencial. Datos obtenidos de http://exoplanets.org.

5.3.1. Métodos de búsqueda de exoplanetas

A continuación se detallan los métodos más usados para detectar la presencia de un planeta.

5.3.1.1. Movimiento en torno del centro de masas

Cuando estudiamos los movimientos de la Tierra en la sección 5.1.4.1, vimos que la Tierra y la Luna se mueven en torno de un punto geométrico, denominado *centro de masas*, que tiene la propiedad que se comporta, dinámicamente hablando, como si toda la masa estuviera concentrada en él. En el caso de una estrella con uno o más exoplanetas, el centro de masas se encuentra mucho más cerca de la estrella (o en su interior), por lo que el movimiento es muy pequeño. Mientras más masivo es el planeta, el centro de masa del sistema está más desplazado del centro de la estrella.

El movimiento del planeta y la estrella en torno del centro de masas es sincrónico (el período de órbita de la estrella es igual al del planeta). Entonces la existencia del planeta produce un centro de masas no concéntrico a la estrella, por lo que aparentemente oscilará entorno de este punto, aunque el planeta no sea visible.

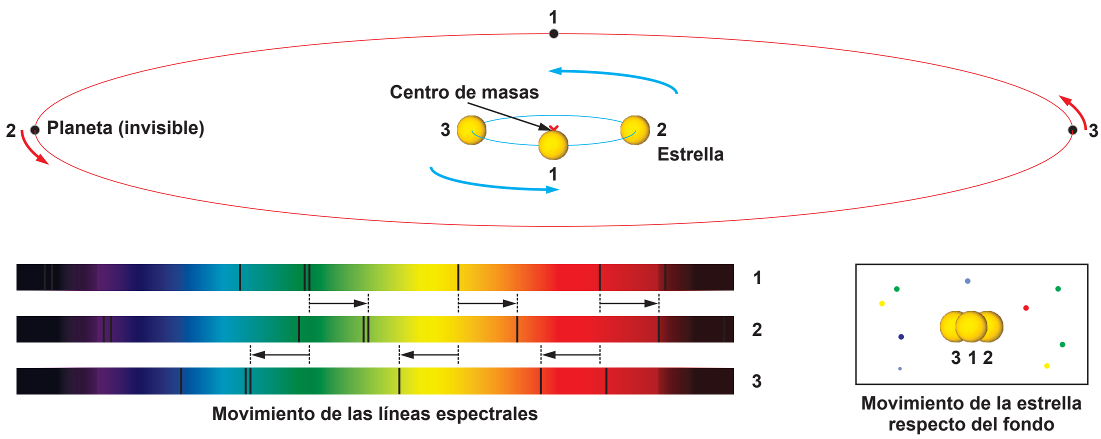


Figura 5.86: La estrella y el planeta se mueven en torno del centro de masas (arriba), lo que produce el movimiento de las líneas espectrales del espectro de la estrella (abajo a la izquierda). En ciertos casos, es posible observar el cambio de la posición de la estrella sobre la esfera celeste (abajo a la derecha).

Usando los métodos que evidencien el movimiento de la estrella en torno del centro de masas, se puede obtener el período de órbita en torno del centro de masa y el radio de la órbita, de forma que usando la tercera ley de Kepler se puede obtener la razón de masas del planeta y la estrella. Los métodos que describiremos a continuación intentan evidenciar la oscilación de la estrella en torno del centro de masas.

Astrometría

Este método mide el cambio de posición de la estrella (un ligero desplazamiento angular sobre la esfera celeste) en su movimiento en torno del centro de masa. Esta técnica solo es sensible a planetas masivos en órbitas lejanas a la estrella y que no se encuentren muy lejos del Sol. Tiene la ventaja de permitir la determinación de la masa del planeta y de la inclinación (i) de la órbita. Mediciones de tipo astrométrico pueden solo ser realizadas desde el espacio, pues en la superficie de la Tierra las estrellas cambian siempre de posición debido a la presencia de la atmósfera, esto es muy evidente hacia el horizonte que se puede evidenciar a simple vista como el *titilar de las estrellas*.

La misión espacial *Gaia* (acrónimo de *Global Astrometric Interferometer for Astrophysics*) es un satélite de astrometría de la ESA, sucesor de la misión *Hipparcos* que permitirá, entre otras cosas, descubrir planetas extrasolares usando la técnica astrométrica.

Velocidad radial

Este método mide el desplazamiento de las líneas espectrales de la estrella cuando se aleja o acerca en su movimiento en torno del centro de masas. Usando el efecto Doppler (ver Apéndice B) se puede obtener la velocidad de acercamiento y alejamiento de la estrella o *velocidad radial* (componente de la velocidad en dirección de la Tierra).

Cuando la estrella se acerca, se produce el desplazamiento de sus líneas espectrales hacia el azul (figura 5.86), si se aleja el desplazamiento es hacia al rojo. Con ello se calcula la variación de la velocidad radial de la estrella.

Para detectar al planeta se debe observar la estrella (en realidad obtener sus espectros) en distintos momentos durante al menos tres revoluciones del planeta en torno a la estrella, por lo que de momento todos los planetas descubiertos por esta técnica son planetas cuyos semiejes mayores no superan unas pocas unidades astronómicas, pese a ello, este método ha sido el más exitoso hasta el momento en el descubrimiento de exoplanetas.

Si observáramos el Sol desde otro sistema estelar evidenciaríamos oscilaciones muy pequeñas producto que Júpiter y Saturno han desplazado levemente el centro de masa del centro del Sol. Las oscilaciones serían con períodos de unos 12 años debido a Júpiter y de unos 30 años debido a Saturno, por lo que necesitaríamos observar el Sol por al menos 36 años para poder descubrir a Júpiter y pese a que en principio necesitaríamos observar unos 90 años para poder descubrir a Saturno, es posible inferir su presencia a partir de ciertas características de la curva de velocidad radial de Júpiter.

Los planetas de tipo terrestre, son muy poco masivos para producir variaciones de velocidad radial medibles con la tecnología actualmente disponible. Mientras menos masa tenga el planeta, más precisión requieren los instrumentos para detectar las oscilaciones. Por ejemplo, Júpiter que produce las mayores oscilaciones en el Sol, con amplitudes de unos 10 [m/s]. Esta velocidad, del orden de la velocidad de caminata de una persona, lo que es muy difícil de medir en una estrella. Saturno produce amplitudes de unos 3 [m/s]; Urano y Neptuno del orden de 1 [m/s]; en cambio la Tierra produce una velocidad radial

máxima del orden de 10 [cm/s]. En la actualidad el espectrógrafo de más alta precisión es HARPS (acrónimo del inglés *High Accuracy Radial velocity Planet Searcher*; buscador de planetas por velocidad radial de alta precisión) instalado en 2002 en el telescopio de 3,6 metros del Observatorio de La Silla (Chile) y su gemelo instalado en 2012 en el *Telescopio Nazionale Galileo Galilei* del Observatorio del Roque de los Muchachos (isla de La Palma, Canarias, España), que está diseñado para alcanzar precisiones de 0,97 [m/s].

5.3.1.2. Fotometría

Este método usa el cambio de luminosidad cuando un planeta transita frente a su estrella desde nuestra línea de visión. Esto solo se puede observar si el planeta tiene un plano de órbita que permita desde nuestra posición, el tránsito.

A partir de la curva de luz (figura 5.87) y conociendo el tamaño de la estrella, puede deducirse el tamaño del planeta, además los planetas que realizan tránsitos permiten usar el método de la velocidad radial, que permite calcular las masas, así utilizando ambos métodos se puede determinar la densidad del planeta, y con ello obtener información acerca de su estructura interna, por ejemplo si es de tipo gaseoso o rocoso.

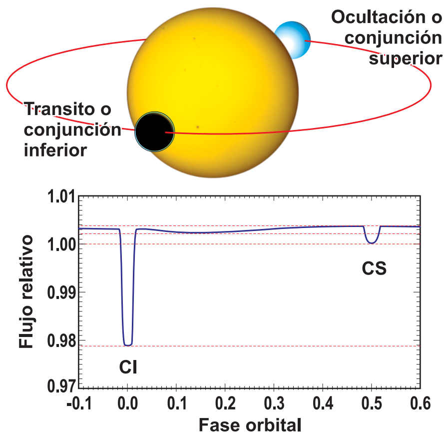


Figura 5.87: Tránsito y ocultación planetario, y la curva de luz de la estrella. Observe que solo durante la conjunción superior (CS) el 100 % de la luz recibida corresponde a la estrella y que fuera del tránsito o la ocultación, la luz recibida varía levemente debido a las fases del planeta.

Como se puede observar de la curva de luz mostrada en la figura 5.87, la detección de un planeta que realice tránsitos y ocultaciones requiere instrumentos capaces de detectar variaciones en luminosidad del orden del 2 %. Para que un planeta produzca esta variación de luminosidad se requiere que sea un planeta de gran tamaño relativo y/o además tenga orbitas muy próximas a la estrella. Para ilustrar la dificultad inherente del método, los astrofísicos intentan medir algo equivalente a la disminución del brillo de un faro muy lejano cuando un insecto pasa delante de él.

Por lo que hasta el momento, la técnica ha permitido detectar planetas de gran tamaño y en órbitas cercanas a la estrella.

En la actualidad existen dos telescopios espaciales dedicados principalmente a la búsqueda de planetas transitantes en torno de otras estrellas: CoRoT y Kepler lanzados en el año 2007 y 2010 respectivamente. En particular, estos telescopios están a la caza de planetas rocosos con masas mayores a la de la Tierra, las denominadas *supertierras*.

Es importante mencionar que no solo el tránsito de un planeta puede producir una disminución de la luminosidad de una estrella, ésta también puede ser producida por actividad estelar como manchas fotosféricas o una compañera binaria no detectada. De hecho se han anunciado y/o publicado falsos positivos que han resultado por ejemplo ser manchas estelares, por lo que las técnicas se han tenido que refinar para discriminar cuando efectivamente se está en presencia de un exoplaneta. Por lo mismo se evita buscar planetas en estrellas activas. En general son activas las estrellas frías y jóvenes, las estrellas como el Sol, ni tan frías ni tan jóvenes, son prácticamente inactivas.

5.3.1.3. Microlentes gravitacionales

El método usa un fenómeno predicho por la *teoría general de la relatividad*: los "*microlentes gravitacionales*". El efecto de lente gravitacional ocurre cuando la luz de una estrella pasa por las inmediaciones de un cuerpo. Su masa desvía la luz hacia dicho objeto. Este hecho ha sido comprobado en eclipses de Sol y lentes gravitacionales con galaxias actuando a modo de lentes.

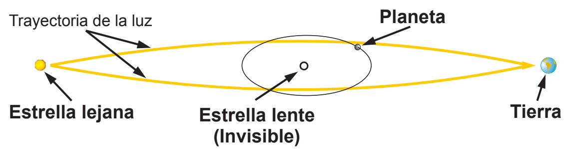


Figura 5.88: Una estrella que pasa frente de una estrella lejana, en vez de producir una disminución en el brillo de ésta, puede actuar como una lente y dirigir los rayos de luz procedentes de la estrella lejana, concentrándolos hacia nuestro planeta.

En el caso de los planetas extrasolares, una estrella, normalmente no visible, es el cuerpo que actúa como lente al interponerse entre la Tierra y una estrella más lejana y brillante.

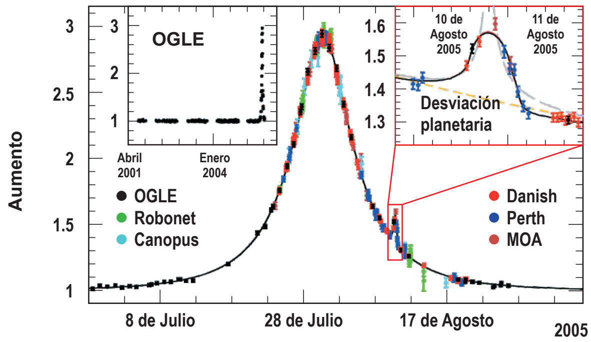


Figura 5.89: Si la estrella lente posee un exoplaneta, éste puede evidenciarse si produce una pequeña variación en el brillo de la estrella lejana cuya luz ya ha sido aumentada por la estrella lente. El planeta no se observa e incluso ni siquiera la estrella lente que orbita, sólo vemos el efecto de su gravedad en la pequeña microlente que produce. Esto es justamente lo que se observa en la curva de luz de OGLE-2005-BLG-390. Créditos: ESO.

Para que el método funcione, los tres cuerpos tienen que estar casi perfectamente alineados. Si no se produce una alineación perfecta, no hay forma de descubrir el planeta con este método. El principal inconveniente es que el fenómeno no es repetible. En principio si las observaciones se repitiesen, se podría obtener la relación entre la masa del planeta y la masa de la estrella que actúa como lente, y con ello calcular la masa del planeta.

Esta técnica permite también encontrar enanas marrones y es una de las pocas, en la actualidad, capaz de detectar planetas similares a la Tierra, aunque el método sólo permite detectar planetas situados a distancias de 1 a 4 [UA] de la estrella, en la denominada *zona de microlente*.

Las observaciones pueden ser realizadas desde la superficie terrestre y sin la necesidad de grandes telescopios, por ello es una técnica de bajo costo.

5.3.1.4. Observación directa

Aunque la avalancha de descubrimientos de estos últimos años puede hacer pensar que es fácil detectar planetas extrasolares, no es precisamente así, ya que son muy pequeños y poco luminosos comparados con las estrellas a las cuales orbitan. Por ejemplo, la Tierra es mil millones de veces menos brillante que el Sol. Aún así, el desarrollo de nuevas tecnologías y de los telescopios espaciales han permitido encontrar un gran número de ellos, ya que, aunque la razón de brillo es desfavorable en el rango visible, es algo más favorable en el infrarrojo, pues una estrella típica es "sólo" 1 millón de veces más brillante que un planeta.

La detección directa de la luz reflejada por los planetas aporta datos para conocer la composición de sus atmósferas, nubes e incluso información acerca de la superficie.

Para la observación directa en estrellas de secuencia principal se usan varias técnicas,

una de ellas es la técnica de *coronografía*, que consiste en cubrir la emisión de la fuente brillante, en este caso de la estrella, de modo que puedan detectarse compañeras débiles o planetas. Este ocultamiento se consigue con una máscara de baja reflectividad con una porción de campo cubierto por una máscara de ocultación.

Para conseguir observar los planetas extrasolares, se requiere mejorar el poder de resolución de los telescopios terrestres, lo que se consigue a través de la técnica de interferometría, que emplea varios telescopios que esten perfectamente sincronizados. Esta técnica se usa en radioastronomía desde hace varias décadas, pero su aplicación al rango visible requiere una mayor precisión en la sincronización. De cualquier forma, el aumento de resolución de los telescopios terrestres no necesariamente conlleva una mejor resolución en las imágenes, pues no trabajan a la resolución teórica sino que están limitados, debido a los efectos de la turbulencia atmosférica, al valor del "*seeing*"[33] en el momento de la observación. Esto es subsanado con las técnicas de óptica adaptativa que compensan parcialmente en tiempo real los frentes de onda y, en un sistema de lazo cerrado, se modifica la forma de un espejo deformable para compensar y corregir, con un pequeño desfase, el efecto de las turbulencias.

Los interferómetros además de dar una muy buena resolución angular, se pueden usar para interferir destructivamente la luz que procede del centro del campo, esto es literalmente "apagar" o anular la luz de la estrella, mientras que el resto de la luz se sigue observando normalmente (figura 5.92).

En la actualidad los telescopios terrestres que cuentan tanto con interferometría como con óptica adaptativa son los telescopios Keck, el LBT (acrónimo del inglés de *Large Binocular Telescope*) y el VLT (acrónimo del inglés de *Very Large Telescope*).

Pese a esta enorme dificultad, en 2004 se obtuvo la primera fotografía directa de un planeta extrasolar orbitando alrededor de la enana marrón 2M1207 (figura 5.90) que está a 230 años luz del Sol y a partir de octubre de 2008 se cuenta con los primeros planetas descubiertos por observación directa en estrellas jóvenes de secuencia principal.

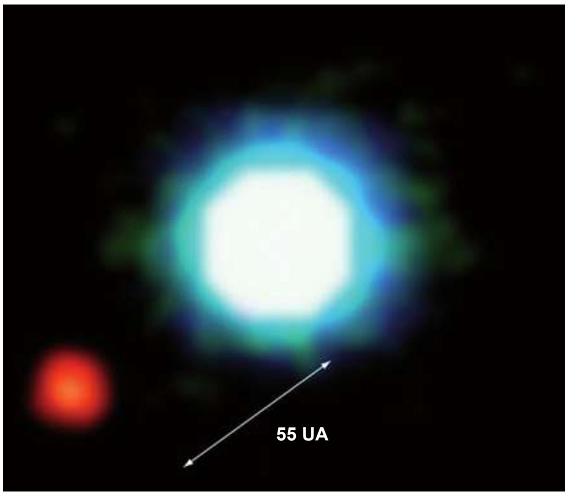
5.3.2. Diversidad exoplanetaria

El descubrimiento de planetas extrasolares ha sido una verdadera revolución en el conocimiento de las ciencias planetarias. Los nuevos exoplanetas han puesto en serios aprietos las ideas acerca de la formación, clasificación y ubicación de los planetas.

Como hemos ya mencionado, se han descubierto planetas en estrellas donde no se esperaba que existiesen: enanas marrones, enanas blancas y púlsares; y en ubicaciones que no parecían congruentes con los modelos de formación del sistema solar. Ha sido tal la diversidad, no solo de los exoplanetas sino que también de los distintos sistemas planetarios, que hasta se ha llegado a cuestionar si el sistema solar sería un sistema planetario típico.

Para que se formen planetas en torno de estrellas, se requiere la existencia de un disco, en el caso de una estrella de neutrones podría formarse a partir del material de la supernova que vuelve a caer sobre el remanente compacto. El telescopio espacial Spitzer ha comprobado la existencia de discos en torno de enanas marrones y también de enanas

[33] Se denomina *seeing* al efecto distorsionador de la atmósfera sobre las imágenes astronómicas, es causado por turbulencias atmosféricas que producen cambios locales de presión y temperatura que tienen un efecto sobre el índice de refracción del aire. Para cuantificar la calidad del cielo, se suele usar la escala de seeing de Tombaugh-Smith que mide el tamaño angular del disco estelar o de seeing. Mientras menor es el tamaño del disco, menor es el efecto distorsionador de la atmósfera.



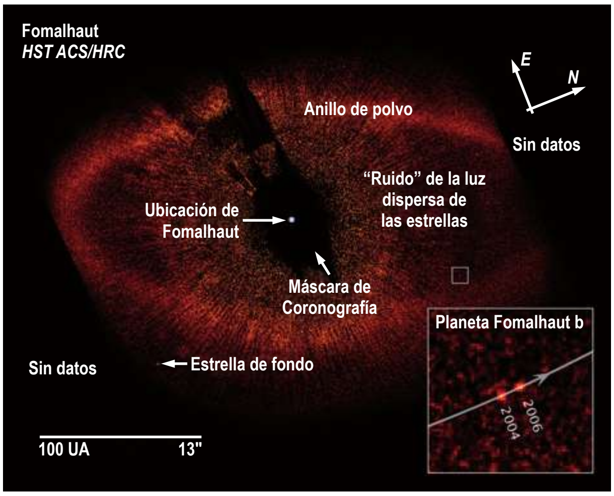
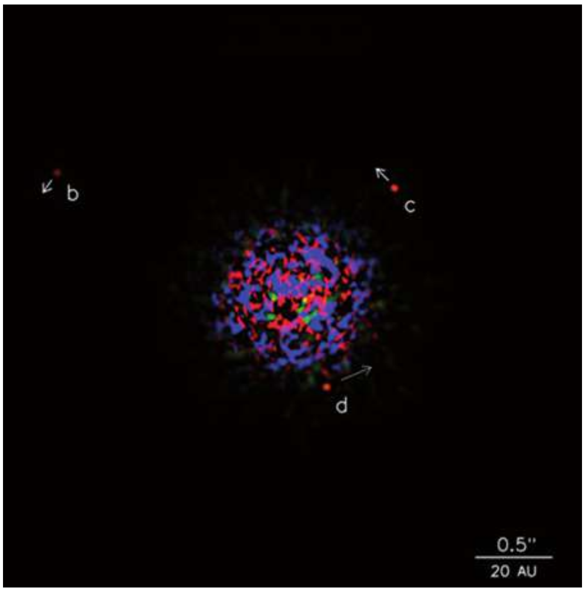


Figura 5.90: Izquierda: imagen de la enana marrón 2M1207 y su planeta (disco rojo). El planeta tiene una masa de 5 masas de Júpiter y la estrella 4 veces ese valor. Orbita a 2M1207 a una distancia de unas 55 [UA], completando una revolución alrededor de 2M1207 cada 2.450 años. Créditos: VLT/ESO.

Figura 5.91: Derecha: Mosaico obtenido con el telescopio espacial Hubble usando la técnica de coronografía. Se puede observar con claridad el disco de polvo que rodea a la estrella Fomalhaut. El diminuto punto de luz ampliado en el cuadro de la esquina inferior derecha es el planeta denominado como Fomalhaut b, el cual es aproximadamente tres veces más masivo que Júpiter y orbita a Fomalhaut a una distancia de 115 [UA]. Créditos: NASA/ESA & Kalas et al. (2008). Reproducido con el permiso de la AAAS.



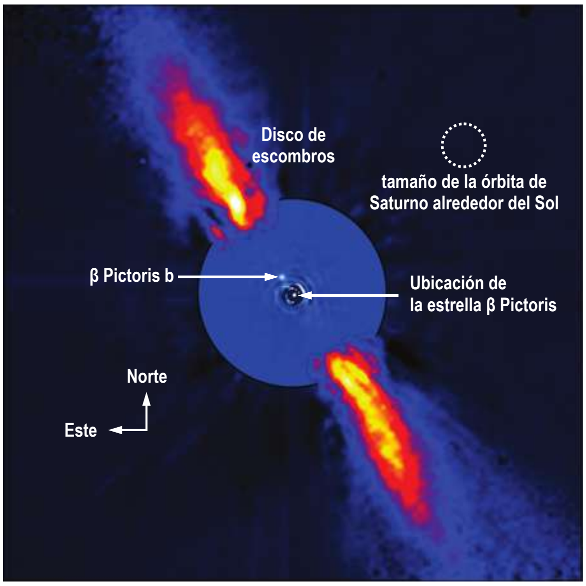


Figura 5.92: Izquierda: Usando la técnica de anulamiento, se descubrió que la joven estrella HR8799 que dista unos 130 años luz del Sol, posee un sistema planetario múltiple. Los tres planetas denominados con las letras d, c y b poseen masas entre 5 y 13 $[M_J]$ y orbitan HR8799 a 24, 38 y 68 [UA] respectivamente. Créditos: Marois et al. (2008), NRC Canadá. Reproducido con el permiso de la AAAS.

Figura 5.93: Derecha: El famoso disco protoplanetario de la estrella *Beta Pictoris* que dista 70 años luz del sistema solar, posee anillos circumestelares de polvo de silicato, a 6, 16, y 30 [UA] que podría explicarse por la presencia de un planeta gaseoso de 2 a 5 $[M_J]$ a unas 10 [UA] de la estrella. Usando VLT dieron con un débil punto de luz a unas 8 [UA] de la parte central del disco. Su período orbital es de 16 años y debe poseer unas 8 veces la masa de Júpiter. Créditos: ESO/A.-M. Lagrange et al. (2009).

blancas. En el caso de éstas últimas se ha evidenciado presencia de elementos químicos pesados en sus espectros, lo que se podría explicar con la existencia de discos compuestos de asteroides pulverizados por la gravedad de la estrella, lo que mostraría que el material planetario puede sobrevivir a las etapas finales de las estrellas. A modo de ejemplo, la joven enana blanca WD 2226-210 posee un disco que se extiende a una distancia de unas 100 [UA], distancias muy grandes para ser solo producto de asteroides pulverizados.

Por otra parte, que las enanas marrones sean estrellas fallidas, no les impide que puedan poseer un disco que sea lo suficientemente masivo para formar planetas, quizás no para formar gigantes gaseosos pero si gigantes helados.

Respecto de las estrellas de secuencia principal, lo que se ha descubierto estudiando los parámetros orbitales, es un gran número de planetas gigantes muy cercanos a las estrellas (ver figura 5.95) y algunos con órbitas muy excéntricas (ver figura 5.94).

Para conocer características del planeta necesitamos conocer su densidad. La masa del planeta solo se puede determinar si se conoce el ángulo de inclinación de su órbita, y éste solo se conoce cuando el planeta además transita

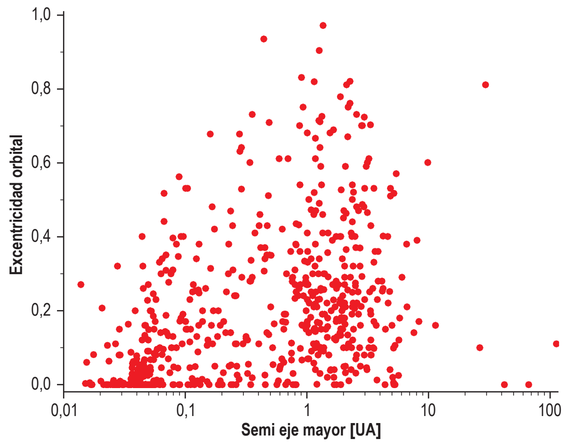


Figura 5.94: Gráfica de excentricidad orbital en función distancia a la estrella, se observa que los planetas cercanos a sus estrellas tienen órbitas poco excéntricas y que la dispersión en excentridades aumenta con la distancia. Datos obtenidos de http://exoplanet.eu/.

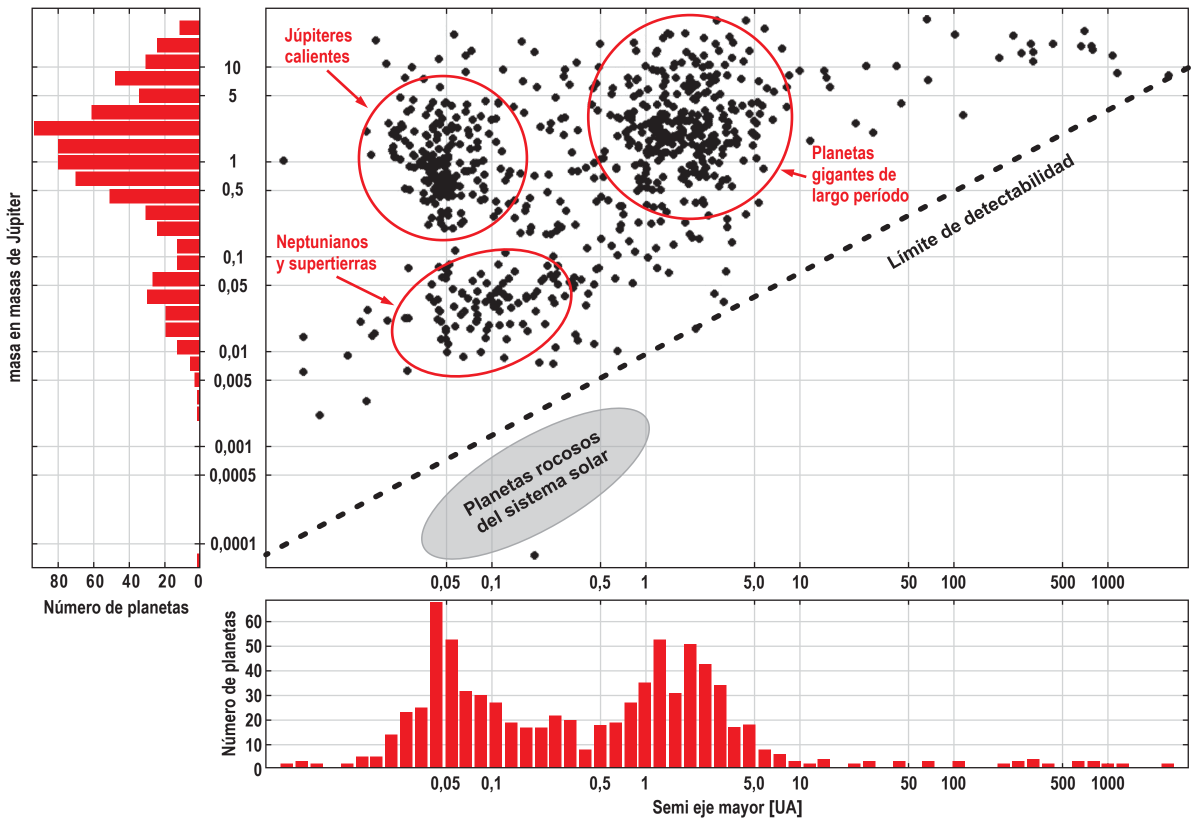


Figura 5.95: Distribución de planetas de acuerdo a su masa y distancia a la estrella. Observe que existen tres poblaciones de planetas. Datos obtenidos de http://exoplanet.eu/.

frente a su estrella desde nuestra posición, pero además cuando el planeta transita frente a la estrella podemos determinar su tamaño, por lo que, estudiando los tránsitos y las velocidades radiales de un mismo planeta, se puede obtener el radio y la masa del planeta y con ello saber que tipo de planeta es, si rocoso o gaseoso. Todos los planetas descubiertos por el método de tránsitos pueden ser estudiados por el método de velocidades radiales, pero no todos los planetas descubiertos por el método de velocidades radiales transitan frente a su estrella desde nuestro punto de vista.

Para ilustrar la diversidad exoplanetaria a continuación daremos algunos ejemplos de explanetas y exosistemas planetarios.

5.3.2.1. HD 209458 b

En 1999 se descubrió el primer planeta extrasolar con el método de tránsito planetario en torno de la enana amarilla HD 209458[34]. El descenso en el brillo de la estrella, llamado también *profundidad del tránsito*, es de 1,7 %. En realidad, desde abril de 1991 el satélite *Hipparcos* había capturado cinco tránsitos planetarios de las 89 observaciones de la estrella HD 209548, aunque los datos recopilados por la misión, fueron publicados solo después de 1997.

Dado que HD 209458 b pasa entre la Tierra y su estrella periódicamente, se ha podido obtener una mayor información sobre su órbita, tamaño y atmósfera. En la actualidad, el planeta HD 209458b es del que se conocen más datos.

Se sabe que posee una órbita prácticamente circular de radio de 0,047 [UA], un octavo del radio de la órbita de Mercurio, por lo que tarda en completar una órbita en solo 3,5 días terrestres. El radio del planeta es 1,38 [R_J] y su masa es de 0,7 veces la masa de Júpiter, por lo que es un gigante gaseoso. Al ser menos masivo pero de mayor tamaño que Júpiter, es menos denso. Su densidad media es de un quinto de la densidad del agua (0,2 [g cm^{-3}]), el menos denso conocido hasta el momento, menor que el menos denso del sistema solar: Saturno. Se dice que el planeta es un *gigante hinchado*.

En 2003 se detectó que posee una atmósfera que se extiende en forma similar a la cola de un cometa. Las moléculas detectadas en su atmósfera son hidrógeno, agua, sodio, y algunas moléculas que son típicas de las atmósferas de estrellas frías (TiO y VO). La forma particular de la atmósfera sería causada por una pérdida considerable de masa, debido a que su atmósfera estaría siendo evaporada producto de su proximidad a la estrella. Se piensa que este tipo de planetas en órbitas inferiores a 0,1 [UA] sufren una importante evaporación de sus atmósferas.

5.3.2.2. Supertierras

Los planetas descubiertos en 1992 en torno al púlsar PSR 1257+12 poseen masas de 0,025 [$M_\oplus$] y 4,3 [$M_\oplus$], y como hemos mencionado con anterioridad se consideraron posibles remanentes de núcleos rocosos de planetas gigantes. Sin embargo, en 2005 se descubrió en torno a la enana roja Gliese 876 el planeta Gliese 876 d, de período orbital de 1,94 [días] (lo que lo hace un planeta caliente) y masa $M \sin i = 0{,}021$ [M_J], esto es, una masa menor a la de Neptuno (1 [M_N] $\approx$ 0,046 [M_J]) pero mayor a la masa de la Tierra (1 [$M_\oplus$] $\approx$ 0,003 [M_J]). Este tipo de planetas, inexistentes en el sistema solar, son

[34]HD 209458 es una estrella de octava magnitud de la constelación del Pegaso que se encuentra a 154 años luz del Sol.

denominados *supertierras*. Se dice que un exoplaneta es una supertierra si $M \sin i \leq 0{,}03$ [M_J].

La estructura interna de una supertierra no se puede inferir a partir del valor $M \sin i$. Para poder saber que tipo de planeta es una supertierra, ésta se debe descubrir por el método de microlentes o debe poder estudiarse por el método de tránsito y también por el método de las velocidades radiales. Sin embargo, dado que el descubrimiento por el método de microlentes no permite estudios posteriores, los exoplanetas mejor estudiados son aquellos transitantes ya que además pueden ser estudiados con el método de las velocidades radiales. Este es el caso de los exoplanetas COROT-7b, GJ 1214 b y Kepler-10b.

COROT-7b fue descubierto en 2009 por el telescopio espacial CoRoT, su diámetro es de 1,68 veces el de la Tierra y su masa es de 4,8 masas terrestres, por lo que su densidad es muy similar a la de la Tierra. Dada su cercanía a la estrella, se estima que tiene una elevada temperatura, del orden de 1.000 a 1.500 °C.

GJ 1214 b fue descubierto en 2009, su diámetro es de 2,67 veces el de la Tierra y su masa es de 6,55 masas terrestres, por lo que su densidad es de solo 36 % la densidad de la Tierra. Su semieje mayor es de 0,014 [UA] pero al ser su estrella una enana roja que posee aproximadamente la mitad de la temperatura del Sol, su temperatura sería del orden de 120 a 282 °C (dependiendo de cuanta luz refleje su atmósfera al espacio).

Kepler-10b fue descubierto en 2010, su diámetro es de 1,42 veces el de la Tierra y su masa es de 4,55 masas terrestres, por lo que su densidad se encuentra entre 1,55 y 2,03 veces la densidad de la Tierra (considerando las incertezas en la masa). Kepler-10 se encuentra a 560 años luz del Sol en la constelación de Draco y aunque es una estrella de tipo solar, es más vieja que el Sol, se estima que tiene una edad de $11{,}9 \pm 4{,}5$ mil millones años. El semieje mayor es de 0,016 [UA], su temperatura sería del orden de 212 °C.

Lo que podemos deducir de estas supertierras es que COROT-7b y Kepler-10b son planetas rocosos, sin embargo, GJ 1214 b posee una densidad similar a la de Neptuno (ver figura 5.96), por lo que es posible que sea un mini-Neptuno, aunque existe la posibilidad de otras configuraciones que produzcan la misma densidad: un planeta rocoso con una atmósfera rica en hidrógeno o un nuevo tipo de planeta: un planeta cuya superficie está completamente cubierta por un océano, en lo que algunos denominan un planeta *oceánico*. Un planeta oceánico se formaría a partir de la migración a una órbita interna de un planeta helado, que debido a la mayor cercanía a la estrella, sus hielos se derretirían pasando al estado líquido. Los océanos serían de cientos de kilómetros de profundidad, y por tanto decenas de veces más profundos que los océanos más profundos de la Tierra. Las altas presiones en las regiones más profundas de los océanos podrían dar lugar a la formación de un manto de formas exóticas de hielo. Hacia el borde exterior, es posible que

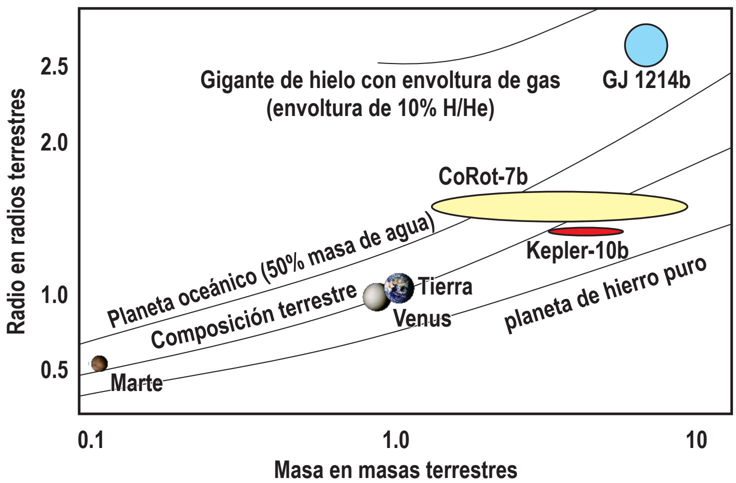


Figura 5.96: Gráfica de masa versus radio para los planetas rocosos del sistema solar y las supertierras COROT-7b, GJ 1214 b y Kepler-10b.

la temperatura del agua alcance el punto de ebullición, no existiendo una superficie y la gruesa atmósfera puede estar compuesta principalmente por vapor de agua, produciendo un efecto invernadero muy fuerte. Este podría ser el caso de GJ 1214 b, pues al parecer su atmósfera estaría compuesta principalmente por agua (figura 6.38).

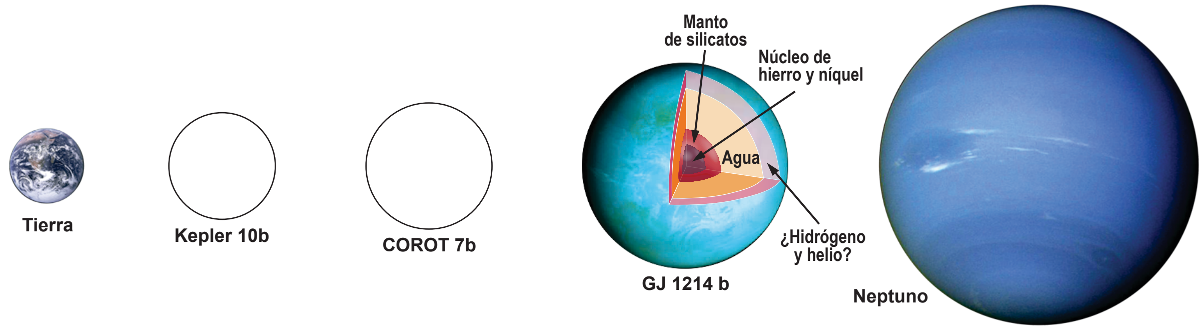


Figura 5.97: Comparación de tamaños de las supertierras Kepler-10b, COROT-7b y GJ 1214 b con la Tierra y Neptuno. Ilustración de GJ1214b reproducida con el permiso de Macmillan Publishers Ltd: Nature 462, 853 © 2009.

Por su parte CoRoT-7b y Kepler-10b deben poseer grandes núcleos de hierro y una composición global similar a la de Mercurio. Se estima que el núcleo de hierro CoRoT-7b sería del 64 % de la masa del planeta y el de Kepler-10b el 59,5 % de la masa del planeta y el 36 % de la masa de CoRoT-7b y el 40,5 % de la masa de Kepler-10b corresponderían al manto de silicatos.

5.3.2.3. Sistema Upsilon Andromedae

En 1999 se descubrió, usando la técnica de las velocidades radiales, el primer sistema planetario múltiple en torno de una estrella de secuencia principal, la estrella de tipo solar *Upsilon Andromedae*, que además es una estrella binaria. En la actualidad se conocen 4 planetas en torno de esta estrella; se cree que los cuatro son gigantes gaseosos. El primero de ellos (*ups And b*), descubierto en 1996 es un júpiter caliente con una órbita bastante circular cuyo radio orbital es de 0,059 [UA], completa una revolución en 4,62 [días]. Los planetas descubiertos en 1999 poseen órbitas excéntricas (0,24 y 0,27) y no son coplanares (ver figura 5.98), orbitan a 0,86 y 2,55 [UA] respectivamente. El cuarto de los planetas, es un planeta con una masa muy similar a la de Júpiter y orbita a una distancia también muy similar a la de Júpiter respecto del Sol; 5,25 [UA].

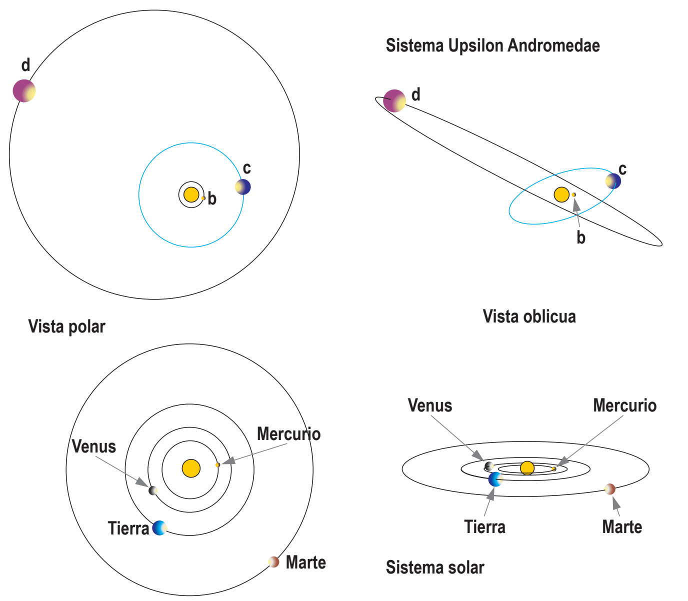


Figura 5.98: Ilustración que permite comparar el sistema solar interior con el sistema de Upsilon Andromedae. Créditos: NASA, ESA, & A. Feild (STScI).

La extraña configuración orbital de los planetas c y d podría haber sido producida por diversas causas, las posibilidades incluyen interacciones que ocurrieran debido a la migración de planetas hacia el interior, expulsión de otros planetas del sistema (dispersión), debido a interacciones planeta-planeta, o la interacción con la compañera binaria de Upsilon Andromedae, una enana roja.

5.3.2.4. Planetas en la zona habitable

Conociendo la distancia del planeta a la estrella, la irradiación de la estrella y la reflexión de la radiación o albedo[35] por parte del planeta, es posible calcular una temperatura superficial de equilibrio. Sin embargo, este cálculo no considera los efectos de la atmósfera. Por ejemplo, para la Tierra se obtiene una temperatura superficial de equilibrio de -17 °C. Este valor es unos 32 °C menor a la temperatura media de la Tierra, la diferencia entre estas dos temperaturas sería una consecuencia del efecto invernadero de la atmósfera terrestre. En el caso de Venus esta diferencia es cercana a los 500 °C.

A partir del cálculo de la temperatura superficial de equilibrio, es posible definir para una estrella una región en la que un planeta podría, bajo ciertas condiciones, poseer agua en estado líquido en su superficie. Esta región es denominada *zona habitable* del sistema planetario. En el sistema solar la zona habitable se encuentra entre las órbitas de Venus y Marte. Sin embargo, la zona habitable debe ser considerada sólo como una referencia ya que para estimar la temperatura en la superficie de un planeta se requiere conocer el albedo como los efectos de su atmósfera, ya que podría existir un planeta fuera de la zona habitable cuya atmósfera permita la existencia de agua líquida. Por otra parte, la zona habitable de una estrella cambia al avanzar la secuencia principal, pues las estrellas aumentan su luminosidad y disminuyen su actividad.

A mediados de 2012 los exoplanetas potencialmente habitables[36] son cinco: Gliese 581 d, HD 85512 b, Kepler-22 b, Gliese 667C c, y Gliese 581 g, de los cuales solo Kepler-22 b es un planeta transitante, los otros cuatro han sido descubiertos por el método de las velocidades radiales y por lo tanto no se conocen bien su masa y radio, sin embargo, Kepler-22b no ha sido aún estudiado por el método de las velocidades radiales.

Kepler-22 es una estrella de tipo solar cuya edad se desconoce y se encuentra a 619,4 años luz del Sol. El planeta Kepler-22b fue descubierto en 2009 y anunciado a fines de 2011. Su radio orbital es de 0,84 [UA] y se encuentra dentro de la zona de habitabilidad. Posee un radio de

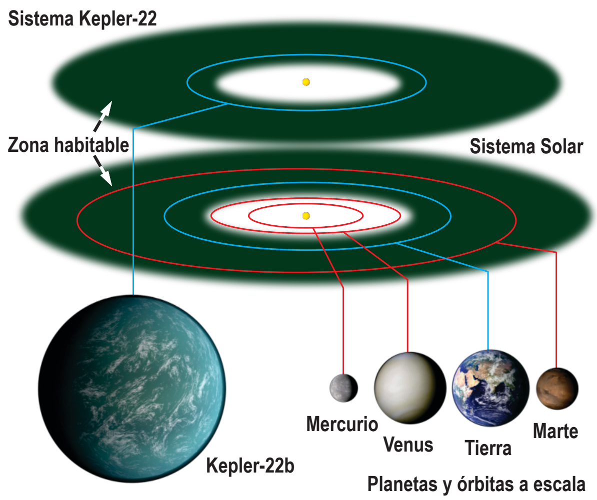


Figura 5.99: Comparación del sistema Kepler-22 con el sistema solar interior, en ambos sistemas se muestran las zonas habitables. Créditos: NASA/Ames/JPL-Caltech.

[35] El albedo es el porcentaje de luz reflejado por la atmósfera.

[36] Para obtener una lista actualizada de los planetas potencialmente habitables revise el catálogo de los planetas habitables (http://phl.upr.edu/projects/habitable-exoplanets-catalog) o la galería de la zona habitable (http://www.hzgallery.org/); ambos sitios en inglés.

2,35 [$R_\oplus$] y su período orbital es de 289.86 [días], su masa se estima menor a 0,11 [M_J] o 34,97 [$M_\oplus$] por lo que es un neptuniano o una supertierra, que a su vez podría ser rocoso o podría ser un mini-Neptuno o un planeta oceánico.

5.3.2.5. Exoplanetas retrógrados

En agosto de 2009 se anunció el descubrimiento del primer y el segundo planeta, WASP-17b[37] y HAT-P-7b[38] respectivamente, cuyo movimiento orbital es en sentido opuesto a la rotación de la estrella, es decir, tienen un *movimiento orbital retrógrado*.

Posteriormente se han seguido encontrando planetas con órbitas desalineadas del eje de rotación de sus estrellas huéspedes y más planetas retrógrados. Dado que los discos protoplanetarios deben rotar en el mismo sentido que la estrella, el mecanismo que parece más plausible para explicar la existencia de planetas retrógrados es la frecuente ocurrencia de colisiones.

5.4. Revisión del modelo de formación planetaria

La teoría nebular predice que alrededor de las estrellas como el Sol deberían formarse planetas con masas como las de la Tierra a Neptuno. En las enanas rojas, que son las más abundantes de nuestra galaxia, deberían formarse a una distancia entre una y diez unidades astronómicas.

Las observaciones muestran la existencia de un número importante de exoplanetas gigantes con períodos orbitales muy cortos y órbitas muy cercanas a su respectiva estrella, los denominados júpiteres calientes, los que no son predichos por la teoría nebular. Estos planetas se formarían en órbitas más externas y migrarían hacia las órbitas interiores.

Una de las hipótesis que explicarían esta migración sería la interacción gravitatoria con el disco circumestelar de material en el que se forma el planeta. Otra de las hipótesis relaciona las migraciones con interacciones con estrellas o planetas compañeros más distante. A lo largo de cientos de millones de años, esto explicaría también la existencia de órbitas inclinadas y excéntricas; la fricción asociada a las fuerzas de marea haría que el planeta pierda energía cada vez que pasa cerca de la estrella, cambiando la forma de la órbita, quedando en una órbita casi circular y cercana a la estrella, pero con una inclinación aleatoria.

La migración de los gigantes gaseosos impediría la formación de los planetas rocosos en la región más interna del disco, expulsando a regiones externas del sistema los protoplanetas existentes en la región interna, por lo que es poco posible que los sistemas con exosistemas planetarios que poseen júpiteres calientes contengan planetas parecidos a la Tierra. Pese a lo anterior, las estimaciones indican que los planetas rocosos deben ser muy frecuentes y en poco tiempo más se debería comenzar a descubrir numerosos planetas rocosos en las regiones interiores de los sistemas planetarios.

[37] WASP es acrónimo del inglés Wide Angle Search for Planets, Buscador Gran Angular de Planetas.

[38] HAT es acrónimo del inglés Hungarian Automated Telescope Network, Red Automática de Telescopios Húngaros.

5.5. Bibliografía del capítulo

- *Mundos Lejanos*. Dante Minniti. Ediciones B, 2007.
- *Exoplanets*. Sara Seager, Renée Dotson, et al. University of Arizona Press, 2011.
- *Teorías del Universo. Vol. III: De Newton a Hubble*. A. Rioja y J. Ordoñez, Editorial Síntesis. 2006.
- *Mercurio: el planeta olvidado*. Nelson, Robert M. *Investigación y ciencia*, p. 4 - 11, enero 1998.
- *Misión Pioneer a Venus*. Luhmann, Janet G.; Pollack, James B. & Colin, Lawrence. *Investigación y ciencia*, p. 62 - 69, junio 1994.
- *El metano en Marte y Titán*. Atreya, Sushil K. *Investigación y ciencia*, p. 6 - 16, julio 2007.
- *The methane cycle on Titan*. Lunine, Jonathan I. & Atreya, Sushil K. *Nature Geoscience* 1, 159 - 164, February 2008.
- *Vientos en los planetas gigantes*. Sánchez Lavega, A. *Investigación y ciencia*, p. 50 - 57, mayo 2004.
- *Plutón*. Richard P. Binzel. *Investigación y ciencia*, p. 20 - 28, agosto 1990.
- *Mapping the variegated surface of Pluto*. Young E.F. et al.*Astronomical Journal* 117, p. 1063–1076, 1999.
- *Encelado*. Carolyn Porco. *Investigación y Ciencia*, Págs. 14-23, marzo 2009.
- *Formation des planètes*. Caroline E. J. M. L. J. Terquem. 2005.
- *La Génesis de los planetas*. Douglas N. C. Lin. *Investigación y ciencia*, p. 14 - 24, julio 2008.
- *Sistemas planetarios extrasolares*. Gregory P. Laughlin. Investigación y ciencia, p. 78 - 88, enero de 2007.
- *Planetas exóticos*. Werner, Michael W. y Jura, Michael A. *Investigación y Ciencia* p. 14 - 21, agosto de 2009.
- *A search for substellar companions to solar-type stars*. Campbell, B.; Walker, G. A. H. & Yang, S. *ApJ* 331: 902-921. 1988.
- *A planetary system around the millisecond pulsar PSR 1257+12*. Wolszczan, A., & D.A. Frail. *Nature* 355: 145-147. 1992.
- *A Jupiter-mass companion to a solar-type star*. Mayor, M. &Queloz, D. *Nature* 378: 355-359. 1995.
- *Optical Images of an Exosolar Planet 25 Light-Years from Earth*. Kalas P. et al. *Science* 322. no. 5906, p. 1345 - 1348. November 2008.

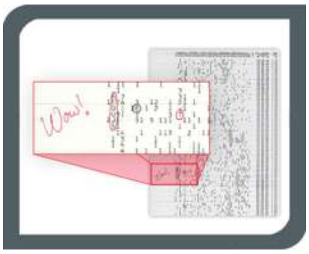
- *Direct Imaging of Multiple Planets Orbiting the Star HR 8799*. Marois C. et al. *Science* 322. no. 5906, p. 1348 - 1352. November 2008.
- *A probable giant planet imaged in the β Pictoris disk*. Lagrange, A.-M. et al. *A&A* 493, L21-L25 (2009).
- *Rocky super-Earth interiors: Structure and internal dynamics of CoRoT-7b and Kepler-10b*. Wagner F. W. et al. *A&A* 541, A103 (2012).
- *A super-Earth transiting a nearby low-mass star*. D. Charbonneau et al. Nature 462, December 2009.
- *Kepler's First Rocky Planet: Kepler-10b*. N. Batalha et al. *ApJ*, 729:27 (21pp), 2011.
- *From 51 Peg to Earth-type planets*. Mayor, M. & Queloz, D. *New Astronomy Reviews*, Volume 56, Issue 1, p. 19-24. 2012.

Diversos articulos de las siguientes direcciones web:

- El Interior de la Tierra y la Tectónica de Placas:
http://www.solarviews.com/span/earthint.htm
- Grupo de Aeronomía del Instituto de Astronomía y Física del Espacio (IAFEF):
http://www.iafe.uba.ar/aeronomia/
- Sismos en México:
http://www.smis.org.mx/htm/sismos.htm
- El Inconstante Campo Magnético de la Tierra:
http://ciencia.nasa.gov/headlines/y2003/29dec_magneticfield.htm
- Nuevos descubrimientos en Mercurio:
http://ciencia.nasa.gov/headlines/y2008/03jul_mercuryupdate.htm
- Soviet Venus Images:
http://www.mentallandscape.com/C_CatalogVenus.htm
- Volcán Extraterrestre:
http://ciencia.nasa.gov/headlines/y2007/09mar_alienvolcano.htm
- Giovanni Virginio Schiaparelli:
http://www.astrogeo.va.it/astronomia/schiaparelli.php
- Out of Whack Planetary System Offers Clues to a Disturbed Past:
http://www.nasa.gov/mission_pages/hubble/science/outofwack_prt.htm
- Kepler-22b, our first planet in the habitable zone of a Sun-like Star:
http://kepler.nasa.gov/news/index.cfm?FuseAction=ShowNews&NewsID=165
- La Enciclopedia de los Planetas Extrasolares:
http://exoplanet.eu/

Capítulo 6

Bioastronomía



Objetivos de aprendizaje

Objetivos generales

- Entregar una visión científica sobre el origen de la vida en la Tierra y la posible existencia de ella en otros lugares de nuestra galaxia.

Objetivos específicos

- Describir los modelos más aceptados que permiten explicar el origen de la vida en la Tierra.
- Presentar teorías alternativas como la panspermia y el principio antrópico.
- Describir y valorar la búsqueda científica de vida extraterreste.

Temas

- Moléculas orgánicas en el espacio interestelar.
- El origen de la vida en la Tierra
- Panspermia
- Principio antrópico
- Vida en ambientes extremos
- Habitabilidad planetaria
- Búsqueda de vida extraterreste

6.1. Introducción

La posibilidad de la existencia de vida extraterrestre es algo que fascina a todas las personas. Sin embargo, para abordar el tema desde el punto de vista científico se requiere no solo utilizar los conocimientos provenientes de la ciencia, sino que también aplicar su metodología.

Para estudiar la posible existencia de vida en otros lugares de nuestra galaxia primero debemos conocer las respuestas a preguntas del tipo:

- ¿Cómo se originó la vida en la Tierra?
- ¿Cuáles son las series de procesos físico-químicos que llevan desde los ladrillos fundamentales de la vida a los primeros seres vivos?

Profesionales de las más variadas ramas de la ciencia tratan de buscar las respuestas formando grupos interdisciplinarios que han dado origen a una nueva rama de la ciencia denominada *bioastronomía*, *astrobiología* o *exobiología*.

La bioastronomía, astrobiología o exobiología es la rama de la ciencia que estudia la vida en el Universo. Dado que su campo de estudio es muy amplio, reúne el conocimiento de muchas áreas científicas como microbiología, química, química orgánica, geoquímica, física, geología, mineralogía, astronomía entre otras.

La bioastronomía utiliza el conocimiento del origen de la vida, su distribución y su evolución presente y futura. Aunque su estudio es universal, a la fecha no se cuenta con muestras confirmadas de alguna forma de vida generada fuera de la Tierra. Sin embargo, los ingredientes fundamentales involucrados en el origen de la vida son universales, por ejemplo se han encontrado moléculas orgánicas en el medio interestelar, incluso moléculas complejas.

Entonces si los ingredientes fundamentales involucrados en el origen de la vida son universales, resulta fundamental estudiar cuales son las condiciones en las que se origina la vida, solo que el único lugar conocido hasta el momento donde esto ha ocurrido es la Tierra, por lo que debemos tratar de entender cómo se originó la vida en la Tierra, y con este conocimiento generar modelos que predigan la formación de vida en otros lugares del Universo.

El estudio de la vida en condiciones extremas nos da una nueva perspectiva para tratar de analizar como y bajo qué condiciones se pudo originar la vida en la Tierra.

Conocemos lugares en el sistema solar, en los cuales se pudo originar la vida y/o que puede existir en la actualidad, por ejemplo, se han encontrado ciertas estructuras microscópicas en meteoritos marcianos que podrían ser restos fósiles de antiguas bacterias marcianas. Más aún, sabemos de mundos que en el futuro podrían tener las condiciones para desarrollar o sustentar la vida.

Por otra parte, el descubrimiento de varios cientos de planetas extrasolares nos muestran lo abundantes que éstos son, por lo menos en la vecindad solar, y ya se han comenzado a encontrar planetas tipo "Tierra", que son el referente que poseemos de "un lugar habitable".

Adicionalmente los esfuerzos desplegados por el Proyecto SETI, (acrónimo del inglés *Search for ExtraTerrestrial Intelligence*, o búsqueda de inteligencia extraterrestre en español) que hace una búsqueda sistemática de señales muy débiles provenientes del espacio

que podrían ser enviadas por seres inteligentes de algún lugar de nuestra galaxia, hacen que ésta sea más apasionante que la ciencia ficción.

Finalmente el reciente descubrimiento de la existencia de agua líquida muy cerca de la superficie marciana, nos hace pensar que en un futuro no muy lejano nos convertiremos en colonizadores de otros mundos.

6.2. Moléculas orgánicas en el espacio interestelar

La química de la materia viviente (ver Apéndice D) esta íntimamente relacionada a la química del espacio, ya que los compuestos orgánicos que constituyen los seres vivientes se encuentran allí. Sabemos que la radiación estelar y los rayos cósmicos pueden gatillar una serie de reacciones químicas en el medio interestelar, y la química orgánica es particularmente dinámica en nubes moleculares, meteoritos, cometas y en las atmósferas planetarias.

Estudios espectroscópicos en radio y microondas han permitido identificar en el espacio interestelar, una cincuentena de compuestos orgánicos sencillos, entre ellos: hidrocarburos, aminas, alcoholes y nitrilos, más aún, la evidencia observacional aportada por la radioastronomía, muestra que los procesos en el espacio interestelar son capaces de producir una gran cantidad de moléculas orgánicas complejas.

En nubes moleculares se producen diversos tipos de reacciones producto de la radiación estelar. A temperaturas de 10 - 50 [K] se crean granos de diversos compuestos congelados. En la superficie de dichos granos se continúan produciendo reacciones químicas. Observaciones, indican que los hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAH) (ver Apéndice D) son extremadamente abundantes en el medio interestelar, hasta el punto que el 10 % del carbono interestelar se encuentra en estos compuestos, siendo la especie más abundante entre las moléculas orgánicas libres en el espacio; mil veces más abundante que la especie siguiente, el formaldehído.

Algunas de estas nubes participarán en la formación de discos protoplanetarios. Existen evidencias que algunos compuestos orgánicos sobreviven a los procesos de acreción. Esto ha sido evidenciado a través de isótopos de deuterio presente en meteoritos.

La riqueza de la química orgánica interestelar se ha podido verificar por ejemplo en meteoritos, donde se han encontrado cerca de noventa aminoácidos diferentes, de los cuales sólo ocho se repiten en los grupos de los veinte aminoácidos usados por los seres vivos terrestres (ver Apéndice D).

6.3. El origen de la vida en la Tierra

Una importante incógnita es cómo se originó la vida en la Tierra. La mayoría de los científicos se inclinan por suponer que la vida se formó en la Tierra producto de una serie de reacciones de material inorgánico unos 100 - 200 millones de años después de solidificarse la corteza terrestre. Esto requiere la síntesis de biomoléculas orgánicas a partir de moléculas más simples. En la actualidad existen interesantes modelos que tratan de explicar algunos procesos que dieron origen a los ácidos nucleicos y posteriormente a células vivas.

Quisiera detenerme un momento para aclarar que no intentaremos definir el concepto de vida, lo cual ciertamente es una limitante, a favor de esta elección podemos decir que

nuestro espectro de comparación es muy limitado, ya que solo conocemos, por el momento, formas de vida terrestres, todas con un origen común.

Otra importante incógnita es si la vida es un fenómeno cósmico, es decir, que cada vez que se den las condiciones ésta se desarrollará o, es un fenómeno muy particular que se origina con una probabilidad bajísima y nuestro planeta es muy particular en el Universo. Existen un par de hipótesis poco aceptadas conocidas como teoría de la panspermia y principio antrópico. El primero afirmando la universalidad de la vida y que esta se origina cada vez que tiene las condiciones y que puede nacer por ejemplo en las nubes interestelares y a través de diversos portadores llegar a los lugares donde se desarrollará y evolucionará; por ejemplo planetas; el segundo indica que la configuración de nuestro Universo esta íntimamente relacionado con la vida misma. Algunas de las modernas teorías del universo primigenio predicen la existencia de infinitos universos, en cada uno de ellos las diferentes constantes universales toman diferentes valores que originarían universos que no formarían vida, pero en el nuestro las constantes tienen los valores adecuados, por ejemplo para que existan estrellas que puedan generar los elementos pesados que contaminen las nubes moleculares que pueden dar como resultado estrellas que formen planetas en donde se puede desarrollar y mantener la vida.

Si bien es cierto, hace solo unas décadas el conocimiento era mucho menor que el que tenemos en la actualidad, el verdadero entendimiento de la vida comenzó realmente con el descubrimiento de la estructura del ADN, sin duda, uno de los avances más importantes del siglo XX. Pero su descubrimiento y sus interesantes propiedades (ver Apéndice D) como que; no sólo es capaz de autorreplicarse sino también, de llevar la información genética necesaria para crear células u organismos muy similares a sus progenitores, trajeron consigo una pregunta tan complicada como el origen mismo de la vida: ¿cuál fue la serie de reacciones químicas que formaron los ácidos nucleicos? La respuesta es desconocida aún, pero algo impresionante es que en la actualidad la síntesis de ácidos nucleicos requiere la intervención de proteínas, pero no hay síntesis de proteínas sin la presencia de ácidos nucleicos. Veremos una posible respuesta a esta incógnita en la sección del mundo del ARN.

Entonces el aporte de las diferentes ciencias como la biología, la física, la química, la astronomía, la geología, y otras, deben dilucidar cómo unas cuantas moléculas fueron capaces de agruparse, evolucionar y llegar a formar lo que conocemos como vida.

Primero debemos comprender cuales son las condiciones en que se originó vida en la Tierra, con este conocimiento podemos proponer hipótesis que sirvan para predecir en qué otros lugares del Universo se puede originar vida, aunque solo tenemos acceso a una pequeña región en torno del Sol. En esta vía, el descubrimiento de vida en condiciones extremas nos da una perspectiva para tratar de analizar cómo y bajo qué condiciones se pudo originar la vida en la Tierra.

6.3.1. Reseña histórica

Hasta la mitad del siglo XVII era completamente aceptado que los seres vivos y el hombre, fueron creados por Dios, y que los otros seres podían aparecer tanto de progenitores, como de forma *espontánea* del fango, estiércol, basura y de otros organismos en descomposición.

Platón pensaba que la materia vegetal y animal solo tomaban vida cuando una esencia inmaterial se incorporaba: la "*psique*". Por su parte Aristóteles consideraba las ideas pre-

cedentes de la *generación espontánea*. Básicamente el modelo supone que los seres vivos nacen de otros seres vivos, pero que de vez en cuando también podrían generarse de la materia inerte.

Las ideas del Génesis bíblico están inspiradas en leyendas egipcias y babilónicas. Hacia fines del siglo IV y principios del V, las autoridades teológicas incorporaron las ideas neoplatónicas generando una concepción propia del origen de la vida.

La generación espontánea fue interpretada como una manifestación del poder divino, por ello, no es extraño que importantes exponentes como Newton y Descartes acogieran esta teoría.

En la mitad del siglo XIX el biólogo francés *Louis Pasteur* (1822 - 1895) conduce un experimento que pone fin definitivamente a la teoría de la generación espontánea, pero trajo consigo el problema de que en algún momento se tuvo que generar un primer ser viviente y el cómo se originó la enorme variedad de seres vivientes que conocemos en la actualidad. La primera interrogante es la que aún tratamos de responder y la segunda encontró solución con la llegada de la *teoría evolucionista* de Darwin. La teoría de Darwin nos lleva a la conclusión que todos los seres vivos que conocemos en la actualidad pudieron derivar de unos pocos seres vivos, o quizás de un único ser viviente.

Respecto al origen de los primeros seres vivos, el químico sueco *Svante Arrhenius* (1859 - 1927), revive la antigua teoría de la panspermia, pero debido a que es muy controvertida solo en los últimos años ha comenzado a ser tomada en serio.

El estudio de los procesos químicos que dieron origen a los ladrillos fundamentales de la vida comienza en 1828, cuando *Friedrich Wöhler* (1800 - 1882) sintetiza por primera vez una molécula orgánica, la *úrea*, partiendo de compuestos inorgánicos como cianato de plata y cloruro de amonio. En 1913 *Walter Löb* (1872 - 1916) logró sintetizar *glicina*, sometiendo formamidas[1] húmedas a descargas eléctricas y a radiación ultravioleta.

Las modernas ideas sobre el origen de la vida en la Tierra nacen en la segunda década del siglo pasado, a través del biólogo *John Burdon Sanderson Haldane* (1892 - 1964), quien parte de la suposición que la Tierra, en el momento en que se originó la vida, era muy diferente de lo que es en la actualidad[2]. Estos conceptos habían sido ya pensados con anterioridad por otros como Darwin, pero ninguno lo hizo con la profundidad que le diera el bioquímico ruso *Aleksandr Oparin* (1894 - 1980) que publicó en 1924 "El Origen de la Vida"; en esencia la teoría de Haldane es la misma que la de Oparin, la diferencia fundamental es la composición de la atmósfera primordial, según Oparin era rica de hidrógeno y según Haldane debería ser rica en dióxido de carbono.

6.3.2. Génesis

Como hemos visto en el capítulo 5, se estima que la Tierra se formó hace unos 4.600 millones de años y hace unos 4.500 millones de años, un cuerpo del tamaño de Marte impactó la Tierra dando como resultado la Tierra y la Luna actuales.

La Luna se formó a una distancia menor de la que se encuentra actualmente. Su distancia a la Tierra era de solo 16.000 [km], la fuerza de mareas producida por la gravedad terrestre ha ido frenando su periodo de rotación, junto con producir un alejamiento entre la Luna y la Tierra[3] (ver Volumen I, sección 3.2). La evidencia de esto último, está dada

[1] La formamida es la amida derivada del ácido fórmico.
[2] Esto no era obvio en aquella época.
[3] La distancia media de la Luna en la actualidad es de 384.000 [km].

por la medición de la distancia Tierra-Luna, a través de precisas mediciones del tiempo de viaje de un rayo láser que es reflejado en la Luna, gracias a un retrorreflector que fue instalado por los astronautas de Apolo XVI, y además los registros geológicos muestran una mayor frecuencia del flujo de las mareas, esto debido a la menor duración del día.

Durante los primeros 500 millones de años producto de los gases expulsados durante la intensa actividad volcánica y de los continuos impactos, se formó una atmósfera primigenia. Se cree que el 95 % de los gases nobles fueron liberados durante los impactos, por otra parte los volcanes primigenios liberaban metano (CH_4), amoníaco (NH_3) e hidrógeno molecular (H_2). Esto ha sido corroborado a través de gases atrapados en rocas derivadas del manto (diamantes y kimberlitas).

Una importante concentración de gases de invernadero debieron permitir que la Tierra temprana no se enfriara bajo el punto de congelación del agua, debido a que el Sol era menos brillante entonces (un 30 % menos brillante hace 4,5 [Ga]). Diminutos cristales de silicato de circonio encontrados en la formación rocosa de Jacks Hills en Australia, indican que la superficie terrestre se enfrió rápidamente, formando continentes y océanos tan temprano como unos 4.400 a 4.300 millones de años, lo cual podría haber dado paso a los primeros seres vivos, que debido al intenso bombardeo del espacio pudieron incluso haberse extintos y resurgidos varias veces.

El agua para formar estos océanos, fue aportada por los volcanes en intensa actividad e incrementada por cometas que ingresaban a la atmósfera. Esta agua debía ser dulce aún, fangosa y debía contener gran cantidad de cenizas, que producto de las intensas y frecuentes lluvias eran transportadas del cielo a la superficie y los mares.

Los océanos primigenios debían contener hierro que al reaccionar con el agua libera H_2, así esta atmósfera debió contener más H_2 que H_2O. Por otra parte el CO reacciona con el H_2 formando CH_4.

De esta forma, la atmósfera primigenia estaba compuesta mayoritariamente por hidrógeno, vapor de agua, nitrógeno, monóxido de carbono, ácido sulfhídrico (H_2S), y minoritariamente por metano, azufre y trazas de dióxido de carbono y dióxido de azufre.

La presión atmosférica depende de la composición química de la atmósfera y los porcentajes que posee cada compuesto, por lo que su estimación es bastante difícil. Por ello no será mencionada en este texto.

Tanto la atmósfera como la superficie interaccionaban con diversas fuentes de energía; la tabla 6.1 nos da una referencia de sus proporciones.

Fuente de energía	Intensidad $\left[\frac{\text{cal}}{\text{cm}^2 \cdot \text{año}}\right]$
Radiación UV de alta frecuencia	570
Descargas eléctricas	4
Radiactividad	0.8
Calor volcánico	0.13
Impactos meteoríticos	0.05

Tabla 6.1: Fuentes de energía en la superficie terrestre. Fuente: El Origen de la Vida. Clair Edwin Folsome.

Al tiempo que disminuía el bombardeo meteorítico, bajo la superficie se consolida un núcleo. El hierro y el níquel que componían parte del manto superior emigran al centro, formando un núcleo, sobre el cual se forma un nuevo manto y se consolidaba una nueva corteza que es cada vez menos bombardeada.

Aunque el hidrógeno escapa fácilmente de la atmósfera, era parcialmente suplido por las emisiones volcánicas y la disociación del agua, pero además el progresivo cambio de composición química del manto conlleva también una disminución de las emisiones de H_2, y también de CH_4 y NH_3. A lo anterior debemos agregar la fotodisociación UV que sufren

tanto el CH_4 como NH_3 liberando H_2 y N_2.

Progresivamente y principalmente debido a las nuevas emisiones volcánicas, el H_2 disminuye y la fotodisociación del metano y amoníaco en presencia de vapor de agua incrementa las concentraciones de CO_2 y N_2.

Debido a la disminución de hierro en el manto, el magma volcánico posee una composición diferente, constituida principalmente por óxidos metálicos y de silicatos tales como MgO, SiO_2, FeO, Fe_2O_3.

De esta forma casi al término de la época de bombardeos, la atmósfera inicial fue progresivamente sustituida por una nueva atmósfera secundaria compuesta mayoritariamente de vapor de agua, dióxido de carbono, nitrógeno, dióxido de azufre y minoritariamente por azufre, monóxido de carbono y por trazas de metano, ácido sulfhídrico e hidrógeno. Debido a que el nitrógeno es químicamente inerte, sus concentraciones permanecerían prácticamente constante hasta nuestros días.

Con una actividad volcánica todavía importante, los mares y océanos crecían y aumentaban su contenido en sales, ya que las precipitaciones eran frecuentes debido a que el agua saturaba la atmósfera, transportando sedimentación mineral.

Se cree que en estas condiciones es que aparecen los primeros organismos unicelulares, procariontes (*pro*, antes; *karion*, núcleo), heterótrofos[4] y anaerobios[5], pero no se posee registro fósil de ellos. Existen evidencias que sugieren que la vida podría existir desde hace más de 3.700 millones de años. Incluso, evidencia descubierta en rocas de Isua, Groenlandia, indica un posible proceso de fotosíntesis ya en aquella época.

Los fósiles celulares más antiguos se han encontrado en Warrawoona, Australia y tienen entre 3.500 y 3.300 millones de años. Su morfología es muy similar a las actuales cianobacterias y formaron los primeros estromatolitos[6].

La fotosíntesis es un proceso cuya reacción puede ser escrita de forma reducida como:

$$6CO_2 + 6H_2O \rightarrow C_6H_{12}O_6 + 6O_2$$

Básicamente el proceso da como resultado dos tipos de moléculas: un carbohidrato llamado glucosa ($C_6H_{12}O_6$) y oxígeno molecular. La glucosa da lugar a la formación de almidón y varios carbohidratos más y dado que no es liberado a la atmófera, no es de interés para este análisis, cosa distinta ocurre con el oxígeno.

Los organismos acuáticos, similares a algas verdes azuladas, utilizaban la energía del Sol para la fotosíntesis a bajas profundidades, liberando oxígeno molecular (O_2). Los océanos primigenios contenían abundante hierro disuelto que se combinó con el oxígeno producido como remanente de la fotosíntesis. Este óxido de hierro se precipitó al fondo de los océanos. Solo hace unos 2.400 millones de años, el oxígeno se combinó con todo el hierro, lo cual permitió que este fuese liberado a la atmósfera.

De esta forma la fotosíntesis da lugar a un nuevo cambio de la composición química de la atmósfera. En esta atmósfera terciaria no solo se incrementa la concentración de oxígeno, pues el CO_2 es extraído de la atmósfera por las algas que forman estromatolitos,

[4]Los heterótrofos son organismos que obtienen energía de otro organismo. Los animales son heterótrofos.

[5]Un organismo anaerobio es aquel cuyo metabolismo no requiere la presencia de oxígeno molecular (O_2), incluso puede ser extremadamente tóxico para estos organismos.

[6]Los estromatolitos son estructuras organo-sedimentarias laminadas (principalmente de $CaCO_3$) adheridas al sustrato, producto de la actividad metabólica de microorganismos (principalmente cianobacterias o algas cyanoprokariotas), aunque también las clorofitas participan en la precipitación de carbonatos.



Figura 6.1: Hierro depositado en el fondo del océano producto de la actividad fotosintética que ha aflorado a la superficie en Australia. Créditos: Simon Poulton.

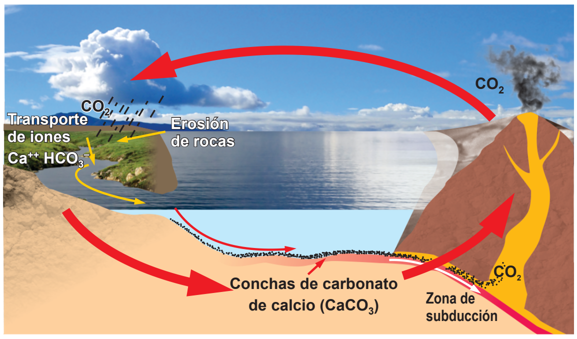


Figura 6.2: Ciclo del carbono: el CO_2 es reciclado gracias a la tectónica de placas. Adaptada con el permiso de Annual Review of Astronomy and Astrophysics, Volume 41 © 2003 de Annual Reviews, http://www.annualreviews.org.

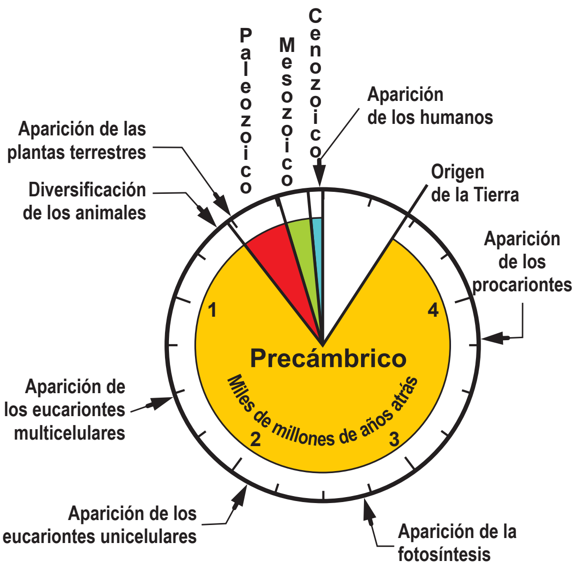


Figura 6.3: Hitos biológicos importantes en la vida de la Tierra.

y es usado para formar carbonato de calcio ($CaCO_3$), produciendo una disminución de este gas atmosférico, lo que puede implicar una disminución de la temperatura del planeta. Así los seres vivos produjeron un cambio de la composición química de la atmósfera y una modificación del clima global producto de la disminución del dióxido de carbono. De todas formas, el CO_2 se repone parcialmente en la atmósfera debido a que el movimiento de las placas tectónicas hace que este sea reincorporado al manto en las zonas de subducción pudiendo ser expulsado a la atmósfera a través de erupciones volcánicas (figura 6.2).

En la alta atmósfera algunas moléculas de oxígeno (O_2) absorben fotones ultravioletas (UV) produciendo oxígeno atómico, este oxígeno atómico en combinación con moléculas de oxígeno forman el ozono (O_3), esta reacción se produce constantemente generando un filtro de rayos UV, lo cual permitirá que los seres vivos puedan salir de los lagos, ríos y océanos a colonizar la superficie sólida de la Tierra. La cantidad de ozono requerida para blindar la Tierra de la radiación UV mortal (200 a 300 [nm]), requiere unos 600 millones de años. En este tiempo, el nivel de oxígeno era aproximadamente del 10 % del actual.

Se han descubierto en el distrito Este de Transvaal de Sudáfrica, restos fosilizados de materia microbiana, principalmente cianobacterias, que se desarrollaron sobre la superficie de la Tierra entre 2.600 y 2.700 millones de años, lo cual podría sugerir que ya existía una capa de ozono en esa época e indica una cota inferior para la colonización de la superficie de la Tierra, por parte de los seres unicelulares, pues los Eucariontes (*eu*, verdadero; *karion*, núcleo) no aparecen en escena hasta tan solo hace 2.000 millones de años.

La colonización de la superficie no tiene mayor relevancia desde el punto de vista del oxígeno molecular atmosférico, pues las plantas mitigan la liberación de este gas con la respiración. En el caso de la fotosíntesis subacuática no es parangonable pues una pequeña parte (cerca del 0,1 %) se deposita en el

subsuelo, siendo esta pérdida de materia orgánica la responsable de la mayor parte del oxígeno atmosférico, otra pequeña cantidad se convierte en otros nutrientes. Esto es particularmente importante pues si los organismos fotosintéticos marinos son los responsables de la mayor parte del oxígeno atmósferico que puede ser usado para buscar vida a nivel microscópico analizando, si es posible, atmósferas de otros planetas en busca de este compuesto. Volveremos sobre esto más adelante. Cerca del 95 % de la respiración que ocurre en los océanos se debe a los microorganismos, liberando gran cantidad de CO_2.

Otro gas interesante de analizar es el metano. Sabemos que en una atmósfera sin oxígeno, el tiempo de residencia debió haber sido cercano a los 10.000 años, y con concentraciones de 1000 [ppm] convirtiéndolo en el principal gas de invernadero.

La producción de metano biogénico era producido por arqueas anaerobias metanógenas a través del proceso denominado metanogénesis y que puede ser resumido como:

$$2\ CH_2 + 4\ H_2 \longrightarrow 2\ CH_4 + 2\ H_2O$$

y era de gran importancia en la Tierra primigenia previo a la oxigenación de la atmósfera, donde el H_2 era tan abundante con concentraciones de 1000 [ppm], aunque esta cantidad disminuyó con el aumento de las concentraciones de metano. Sin embargo, existen otras formas de realizar la metanogénesis según los sustratos que se encuentren en el medio, por ejemplo se puede efectuar a partir del ion formiato ($HCOO^-$):

$$HCOO^- + H_2O \longrightarrow HCO_3{}^- + H_2$$

De esta forma observamos que antes que el oxígeno sea liberado en la atmósfera debería haber existido una etapa dominada por el metano biogénico. Así la Tierra tuvo una etapa en la cual su atmósfera era levemente similar a la de Titán, el satélite de Saturno.

Además, todo lo anterior nos muestra que la evolución química de la atmósfera de un planeta habitado depende de los procesos biológicos de los microorganismos que lo habitan.

6.3.3. Química prebiótica

Como hemos visto, hace unos 4.600 millones de años, la Tierra era un planeta sin vida, menos de mil millones de años después estaba llena de formas de vida. La serie de reacciones químicas que deben suceder para dar paso a la vida se denomina *química prebiótica*.

La síntesis de compuestos orgánicos, a través de compuestos inorgánicos, se había realizado por casi un siglo, pero al parecer ninguno de ellos con la finalidad de reproducir posibles condiciones prebióticas en que se formaron estos compuestos en la Tierra. En 1951 *Melvin Calvin* (1911 - 1997) intentó infructuosamente sintetizar compuestos orgánicos, simulando una Tierra primitiva. Irradiando soluciones de CO_2 con un ciclotrón de 60 pulgadas, solo obtuvo cantidades bastante apreciables de ácido fórmico.

Ya en 1950, el premio Nobel *Harold Urey* (1893 - 1981) sugirió que la Tierra tuvo una atmósfera reductora[7]. Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno (los planetas gaseosos) tienen esta clase de atmósferas. Una atmósfera reductora contiene metano, amoníaco, hidrógeno y agua. Más tarde en 1953 el estudiante *Stanley Miller* (1930 - 2007) de la Universidad

[7] Un reductor es una sustancia química que provoca la reducción de otra (oxidante), perdiendo electrones y aumentando su número de oxidación.

de Chicago, en el laboratorio de Harold Urey, mediante continuas descargas eléctricas en una cámara que contenía una mezcla de metano, amoníaco, hidrógeno y vapor de agua (figura 6.4), obtuvo como resultado la formación de una serie de moléculas orgánicas (figura 6.5); como ácido aspártico, ácido glutámico, ácido acético, ácido fórmico, entre otras moléculas y los aminoácidos: alanina y glicina. En particular la glicina se obtuvo a partir del formaldehído (HCHO) y del cianuro de hidrógeno (HCN).

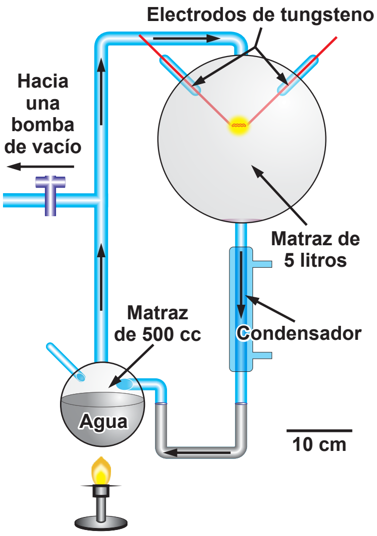


Figura 6.4: El Experimento de Miller. El recipiente inferior contiene agua, que simula un "océano", al calentarlo el vapor de agua que se genera, comienza a circular por todo el sistema. El recipiente superior contiene una "atmósfera", compuesta de metano (CH_4), amoníaco (NH_3), hidrógeno (H_2) y vapor de agua. En el recipiente superior se expone los gases a descargas eléctricas que simulan "relámpagos" y que produce que los gases actúen recíprocamente. Los productos solubles en agua que se obtienen de las reacciones, pasan por un condensador y se disuelven en el "océano" simulado.

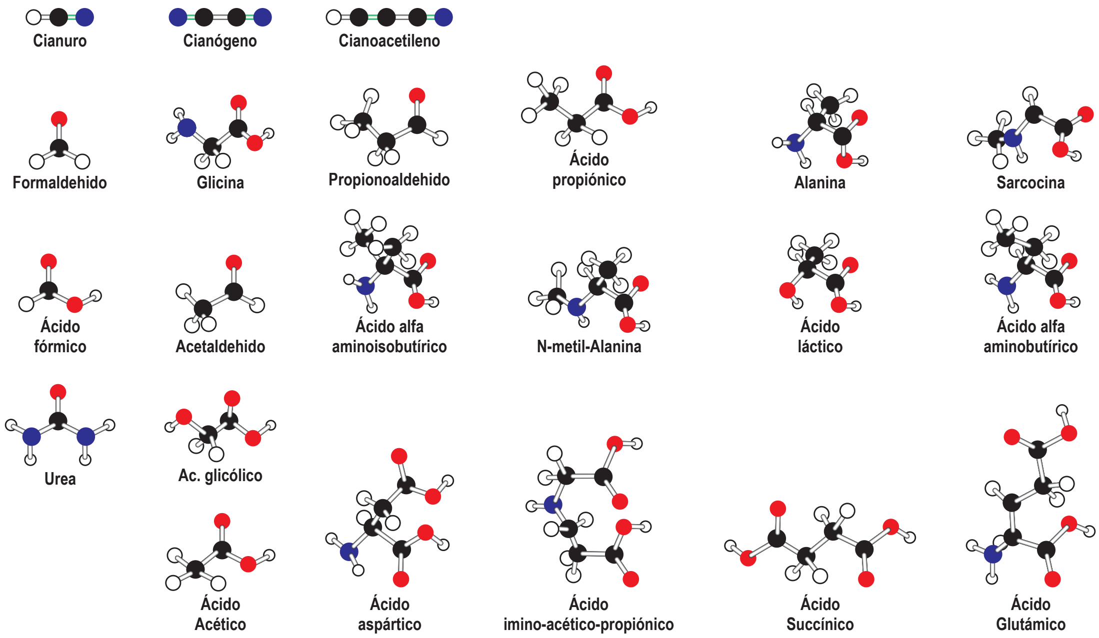


Figura 6.5: Moléculas orgánicas complejas obtenidas en el experimento de Miller.

James Watson (1928 -) y *Francis Crick* (1916 - 2004) dos semanas antes de la publicación de Miller, habían publicado su artículo sobre el modelo de doble hélice del ADN, ambos trabajos, fundamentales para el entendimiento de la vida, convergen con la sintetización en laboratorio de bases nitrogenadas, comenzando con el trabajo de *Joan Oró* (1923 - 2004) quien sintetizó adenina a través de la oligomerización[8] del cianuro de hidrógeno,

[8]La oligomerización es la agregación de moléculas para la formación de una estructura más compleja formada por subunidades independientes.

hasta la reciente sintetización de la citosina y el uracilo.

Si bien en la actualidad sabemos que la atmósfera de la Tierra no tenía las características por ellos supuestas, el experimento es de vital importancia, ya que demostró que era posible obtener en un mundo abiótico, moléculas de importancia biológica, si bien mantiene la interrogante de cómo se formaron en la Tierra los ladrillos fundamentales de la vida y la posterior formación de proteínas.

6.3.4. Cometas, meteoritos y el origen de la vida

Cuando grandes trozos de materia interplanetaria entran en la atmósfera, sus capas externas pueden desaparecer, pero es probable que el centro sobreviva y golpee el suelo. El objeto que golpea el suelo es llamado un *meteorito*. La velocidad con que los meteoritos pequeños golpean el suelo en promedio es de 500 [km/h]. Los laboratorios de investigación poseen alrededor de 3000 meteoritos, estos son de diferentes tipos, meteoritos rocosos, meteoritos ferrosos, y las raras *condritas carbonáceas*.

Las condritas son un tipo bastante abundante de meteoritos hallados sobre la superficie de la Tierra. Son fragmentos del cinturón principal de asteroides. Las carbonáceas, contienen un residuo orgánico rico en hidrocarburos aromáticos y de otras clases, ellos poseen entre 0,35 a 4,8 % de carbono versus 0,1 % en los meteoritos ordinarios. En ellos, se ha identificado cierto número de aminoácidos y de bases nucleótidas.

Probablemente la más conocida y estudiada de las condritas carbonáceas es la que cayó el 28 de septiembre de 1969 en Murchison, Australia, de particular interés resulta al comparar su composición con los resultados del experimento de Miller, ya que muestran aproximadamente las mismas proporciones relativas (tabla 6.2).

Aminoácido	Meteorito	Experimento
Glicina	****	****
Alanina	****	****
Ácido α-amino N-butírico	***	****
Ácido α-aminoisobutírico	****	**
Valina	***	**
Norvalina	***	***
Isovalina	**	**
Prolina	***	*
Ácido aspártico	***	***
Ácido glutámico	***	**
β-Alanina	**	**
Ácido β-amino N-butírico	*	*
Ácido β-aminoisobutírico	*	*
Ácido γ-aminobutírico	*	**
Sarcosina	**	***
N-etilglicina	**	***
N-metilalanina	**	**

Tabla 6.2: Comparación de aminoácidos encontrados en el meteorito de Murchison y los obtenidos en el experimento de Miller. Fuente: L. Orgel, Investigación y ciencia Dic. 1994.

Al igual que los meteoritos, en el polvo interplanetario hay moléculas orgánicas. Los materiales orgánicos aportados por meteoritos y polvo interplanetario en la actualidad pueden llegar a los 10^7 [kg/año].

Los cometas son los remanentes de la formación del sistema solar y ellos pueden haber sido también portadores de compuestos orgánicos, incluso mayores que las condritas carbonáceas.

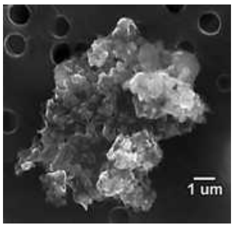


Figura 6.6: Imagen de microscopio electrónico de una partícula de polvo interplanetario obtenida en la estratosfera. Créditos: NASA Johnson Space Center.

Cálculos realizados a principios de la década de 1990, demuestran que el calor generado por impactos a alta velocidad en la Tierra podrían mantener todavía intactos material orgánico que portasen. De esta forma, se pudo aportar constantemente material orgánico a la Tierra y podría ser la respuesta a como se formaron por ejemplo los aminoácidos en la Tierra.

Las evidencias muestran la importancia del material orgánico extraterrestre, aportado tanto por cometas como por meteoritos y polvo interestelar.

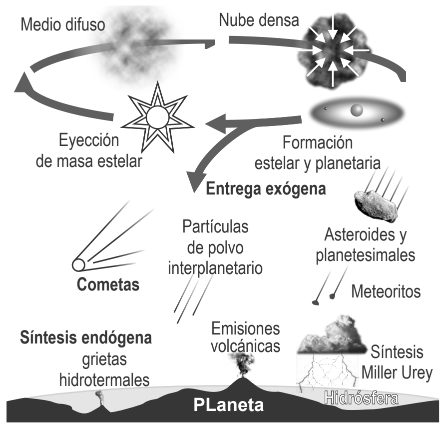


Figura 6.7: Ciclo de transporte de material orgánico interestelar a planetas. El propietario de este material con derechos de autor es Mary Ann Liebert, Inc. editores.

6.3.5. El mundo del ARN

Como mencionamos anteriormente, en la actualidad las proteínas son sintetizadas gracias a las instrucciones del ADN, a su vez el ADN requiere para replicarse enzimas[9], que están compuestas de proteínas, estamos entonces en una problemática similar a la del huevo y la gallina, sólo que esta última es de muy fácil solución.

Una posible solución es la teoría propuesta en los años 60 de manera independiente por *Carl R. Woese*, *Francis Crick* y *Leslie Orgel* y posteriormente en 1986 *Walter Gilbert* le da el nombre de "El Mundo del ARN".

Esta teoría supone la existencia de una molécula más sencilla que el ADN, para portar la información y, que a su vez, cumpla la función de catalizador, incluyendo las reacciones químicas para la autorreplicación. Entonces hubo una época cuando solamente el ARN manejó todas las tareas requeridas para la supervivencia de una célula.

El ARN es utilizado por las células para transportar información y cumple funciones de catalizador biológico en los ribosomas[10]. Aunque sus características en células son limitadas, se han fabricado ribosomas capaces de una amplia clase de reacciones catalíticas, incluyendo unas que promovieron la formación de *enlaces peptídicos* (ver Apéndice D).

Numerosas enzimas son o derivan de ribonucleótidos, la síntesis de desoxinucleótidos se realiza a partir de *ribonucleótidos*. Existen diversos tipos de ARN, cada uno de ellos tiene su propia secuencia de bases, llamada *genotipo* y una configuración tridimensional, llamado *fenotipo*.

Al comienzo, la teoría del ARN tenía el problema que solo existen ocho riboenzimas conocidas en la naturaleza, sin embargo, se ha logrado sintetizar ARN catalizador con la capacidad de autorreplicarse a partir de bloques más simples, con una exactitud en la replicación del 95 %, independiente de la longitud del ARN o del orden de secuencia.

[9]Las enzimas son catalizadores biológicos.

[10]Los ribosomas son ciertos tipos de moléculas naturales del RNA que pueden comportarse como enzimas, catalizando a su propio ensamble.

Aceptando entonces la teoría del mundo del ARN, hemos simplificado la problemática inicial debido a que si el ARN puede actuar como un catalizador, no se requiere ADN ni proteínas, pero ahora surge la pregunta natural, ¿de dónde o cómo apareció el ARN?, ya que si bien es una molécula más simple que el ADN, aún sigue siendo una molécula bastante compleja.

Aunque la teoría del mundo del ARN es una gran alternativa, se piensa que debían existir sistemas replicativos más simples, ya que la teoría del ARN no esta libre de problemas. En un par de cientos de millones de años debieron aparecer sobre la Tierra diversas formas de polímeros como el ARN de origen inorgánico que finalmente evolucionaron en sistemas autorreplicantes.

Existen varios posibles candidatos a antecesores del ARN y ADN, por ejemplo: (L)-a-treofuranosil oligonucleótido (ATN); El piranosil-ARN (p-ARN) y el ácido nucleico peptídico (ANP). Aunque es posible que en los próximos años se llegue a desarrollar un posible ancestro del ARN y se logre sintetizar en condiciones de laboratorio ARN, nunca se podrá saber si en la Tierra prebiótica estas fueron la serie de pasos que dieron origen a los ácidos nucleicos. Por ejemplo, según ciertos modelos computacionales, es posible que la radiación UV haya sido fundamental en la formación de la vida. Estos modelos indican como podría formarse el ARN a partir de azúcar, fosfatos y bases nitrogenadas en presencia de altos niveles de radiación UV, las bases nitrogenadas absorben y dispersan la radiación UV dando protección a la pentosa-fosfato, en otras palabras, las bases nitrogenadas servirían como un escudo protector. De esta forma se podría pensar que estas bases fueron utilizadas inicialmente con esa función y posteriormente habrían cumplido las ya conocidas funciones de transferencia de información. En estos modelos computacionales, los ARN estables ante la radiación UV, permitieron darle a éstos, una ventaja comparativa aumentando en número debido a la selección natural. En un mundo irradiado en grandes cantidades por radiación UV, las moléculas capaces de sobrevivir y/o proliferar serían las que evolucionarían. En este contexto, entendemos por *evolución* (bioquímica o biológica) a cambios aleatorios que ocurren en la replicación o reproducción y que persisten, dando como resultado que el sistema en cuestión (moléculas u organismos vivos) esté mejor adaptado al medio.

Entonces, hace unos 3.900 millones de años algunos tipos de ARN fueron más estables, la replicación pudo tener errores que en algunos casos fueron desfavorables y en otros favorables dando como resultado una familia de ARN, entonces, el ARN catalizaba la formación de enlaces peptídicos entre aminoácidos para la formación de proteínas, el ARN serviría de “molde” que permitiría la formación de péptidos. Al formar el ARN un péptido, éste a su vez podría ayudarlo a replicarse, apareciendo una simbiosis entre este tipo de moléculas. Presumiblemente, el siguiente paso fue la utilización de membranas, que aislaran y protegieran el ARN de reacciones que desfavorecieran la evolución molecular.

Al transcurrir el tiempo, la función de catalizador biológico fue reemplazado por las enzimas que eran más eficientes, las nuevas enzimas pudieron sintetizar el ADN que es más estable y eficiente en la autorreplicación, además esta estructura particular permite la reparación de cadenas dañadas, ya que utiliza la otra semihélice como molde.

Para explicar cada uno de estos pasos existen varias teorías paralelas, cada una apoyada en evidencia experimental, lo cual nos indica que es posible que nunca sepamos realmente cuales fueron realmente la serie de pasos que acontecieron en la Tierra hace unos 3.800 o 3.900 millones de años y que dieron como resultado el maravilloso fenómeno de la naturaleza que denominamos vida, hasta es posible que en el futuro se logre “producir” vida a partir de “no vida”.

6.3.6. Orígenes de las primeras membranas

Es esencial para las futuras células la aparición de las membranas, que podrán mantener en un ambiente adecuado a los ácidos nucleicos. No está claro como nace la simbiosis entre membranas y ácidos nucleicos, pero sin duda esto será un paso certero en la evolución, ya que sin esta relación, es posible que los ácidos nucleicos no pudiesen sobrevivir por mucho tiempo, más aún, si pensamos en ácidos nucleicos catalizadores; es muy importante no perder la información codificada en su secuencia, ya que esta debía ser bastante condensada, tal vez una misma palabra (con un alfabeto de 4 letras) dependiendo de como se leyese, podría contener información de como elaborar diversos polímeros.

Las membranas celulares están compuestas de una bicapa lipídica. Los lípidos están compuestos de dos partes, una *cabeza polar hidrófila* y otra *cola apolar hidrófoba*. El tipo de moléculas que tienen esta configuración son llamadas *anfipáticas*.

Por el momento supondremos la existencia de este tipo de moléculas anfipáticas. Ellas en presencia de agua líquida se auto ensamblan debido a las *interacciones hidrofóbicas* (figura 6.8). La hidrofobicidad es fundamental no solo para la membrana celular sino también para las estructuras de las proteínas (ver Apéndice D).

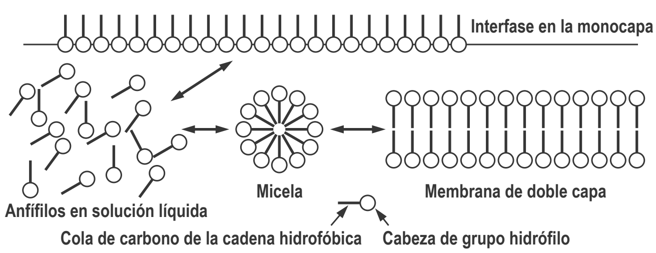


Figura 6.8: Debido a las interacciones hidrofóbicas las moléculas anfipáticas se auto ensamblan en presencia de agua líquida de forma de dejar en contacto con el agua la parte hidrófila y alejando la parte hidrófoba, sobre la superficie se forma una capa. En otro caso colapsan formando pequeñas gotas (micelas) o dobles estratos. El propietario de este material con derechos de autor es Mary Ann Liebert, Inc. editores.

En laboratorio se pueden reproducir diversos tipos de membranas, los principales son los *liposomas*, los *coacervados* y los *proteinoides*.

Las nanocápsulas se fabrican usando fosfolípidos[11]. Al interior de las células, cápsulas similares llamados liposomas (que significa cuerpos grasos), son utilizados para transportar materiales. Algunas características interesantes de los liposomas son por ejemplo que pueden contener moléculas orgánicas, son semipermeables, presentan *fenómenos osmóticos*, pueden tener *potencial de membrana*[12], pueden fusionarse y fisionarse, exhiben metabolismo y excitabilidad.

Otros tipos de membranas no lipídicas son los coacervados, término dado por Oparin a las estructuras coloidales que representaban un paso previo en la evolución de la materia orgánica, que daría paso a las primeras células. Actualmente se denominan coacervados a las pequeñas gotas que se auto ensamblan por interacciones hidrofóbicas cuando se agita una solución de polipéptidos, ácidos nucleicos y polisacáridos. Si se incluyen enzimas entre los ingredientes, los coacervados son capaces de absorber sustratos de su entorno y liberar productos de las reacciones catalizadas por las enzimas, esto es, un rudimentario metabolismo.

[11] Los fosfolípidos son un tipo de lípidos anfipáticos compuestos por una molécula de glicerol, a la que se unen dos ácidos grasos y un grupo fosfato.

[12] El potencial de membrana es la diferencia de potencial entre ambos lados de una membrana que separa dos soluciones de diferente concentración de iones, como la membrana celular que separa el interior y el exterior de una célula.

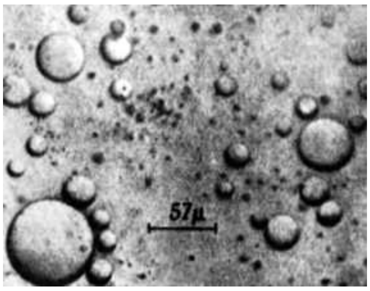


Figura 6.9: Gotas Coacervadas formadas por la interacción entre gelatina y goma arábica. A. I. Oparin. Fuente: The Origins of Life, Cyril Ponnamperuma, E. P. Dutton & Co., Inc. (1972).

En 1957 el bioquímico *Sydney Fox* (1912 - 1998) encontró, calentando una mezcla de 18 aminoácidos en un recipiente metálico a 70 °C en presencia de ácido fosfórico, la formación de estructuras similares a las proteínas[13] que llamó proteinoides para distinguirlas de la moléculas de origen biológico. Estos se forman gracias a que el recipiente metálico evapora el agua producida por la unión de aminoácidos. Posteriormente, en 1958, depositó proteinoides en agua caliente y levemente salada. Al enfriarse el agua, se observó pequeños glóbulos que llamó *microesferas*. Estas microesferas se forman debido a que algunas cadenas de aminoácidos son más hidrofóbicas que otras. La membrana proteínica, al igual que la de las nanocápsulas, son semi-permeables, presentan procesos osmóticos, pueden tener potencial de membrana, pueden fisionarse, exhiben metabolismo y en algunos casos excitabilidad. Las microesferas son utilizadas en aplicaciones farmacéuticas.

Podemos observar que en los casos anteriores necesitamos la presencia de un solvente polar, este lugar lo ocupa el agua. El problema fundamental es que al formarse el enlace peptídico se libera una molécula de agua, de esta forma, es poco probable que esta reacción se realice en un medio acuoso y nos encontramos en una problemática, las membranas se forman en presencia de agua, pero las proteínas no. En este caso no sabemos si las proteínas fueron esenciales para los primeros seres vivos. Contamos aún con el hecho que un ácido nucleico catalizador cumplirá la función de enzimas y por ende no necesitaríamos en primera instancia las proteínas.

Otra posibilidad es que el ensamble de membrana haya ocurrido en un estrato cerca de la superficie entre un medio acuoso e hidrofóbico y aceitoso, así podría no depender de la energía solar como fuente primaria. Este modelo se basa en la polimerización del metano atmosférico creando una capa hidrofóbica de hidrocarburos líquidos en la superficie de la Tierra, que percolarían y serían concentrados, tanto monómeros como polímeros, en un estrato subterráneo cálido y protegidos de la radiación ultravioleta. Este ambiente permitiría todavía la foto-oxidación de hidrocarburos líquidos y reacciones de "*emulsificación*" en la capa de agua-aceite. La capa hidrofóbica en la superficie permitiría también disminuir la evaporación de agua, proveyendo de esta forma, el solvente necesario para las reacciones. Serían estos importantes eventos los que permitirían la formación de membranas. Pero hace 3.900 millones de años, en la atmósfera el metano era solo un gas de traza, de esta manera resulta difícil de comprender que estos eventos hayan realmente sucedido.

Otra posibilidad, es la formación de membranas en las *zonas hidrotermales* (figura 6.10). Estos ambientes tienen la ventaja de poseer una fuente de energía independiente del Sol, ya sea como fuentes térmicas y químicas, pero debido a las débiles fuerzas de auto ensamblaje muchos se inclinan a que ésta no es la vía correcta. Sin embargo, un reciente experimento ha mostrado que es posible el auto ensamble de lípidos y fosfolípidos a altas temperaturas (sobre 120 °C), sus resultados muestran que monocapas de lípidos son capaces de retener diferentes moléculas por algunas horas y que los lípidos no se degradan a esas temperaturas.

[13] La polimerización inorgánica de aminoácidos en proteínas, requiere la formación de enlaces peptídicos, los que sólo ocurren a temperaturas sobre 140 °C.

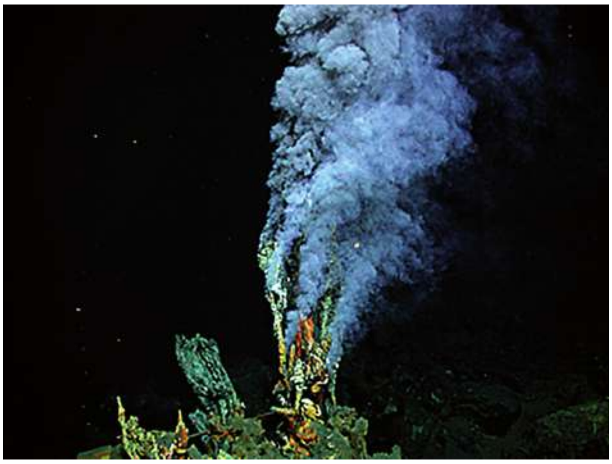


Figura 6.10: Las grietas hidrotermales, descubiertas en 1977, son chimeneas de origen volcánico que se encuentran en las profundidades del Océano. Créditos: Woods Hole Oceanographic Institution.

6.3.7. Orígenes de los primeros seres vivos

El origen de los primeros seres vivos en la Tierra está posiblemente ligado a la existencia de cuatro factores: ácidos nucleicos, membranas, agua y alguna forma de energía. Hemos analizado en general e independientemente cada una de ellas, ahora intentaremos describir posibles formas de como la interrelación entre ellos (que suponemos existentes o en formación) nos llevarán al primer organismo vivo. Tenemos entonces la existencia de los componentes fundamentales de las *protocélulas* o *protobiontes*.

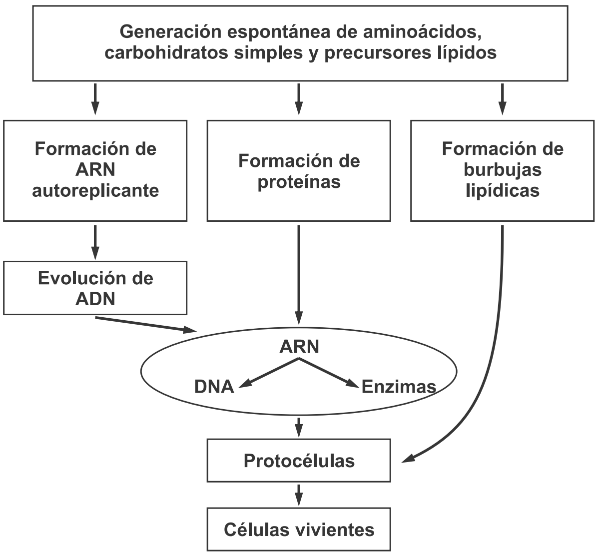


Figura 6.11: Evolución bioquímica que lleva a la formación de las primeras células vivientes.

Las macromoléculas deben en algún momento ser encapsuladas ya sea por monocapas o bicapas de moléculas anfipáticas, ya que puede que éstas no sean permeables a largos polímeros.

Existen dos modelos particularmente interesantes que fueron dados a conocer a principios de la década de 1980 por medio de ciclos de hidratación-deshidratación y congelamiento-descongelamiento, que pueden representar antiguos mares poco profundos o lagunas, donde las monocapas pueden atrapar largos polímeros (tipo ácidos nucleicos) como sándwich.

Por otra parte también se ha propuesto que los primeros seres vivos se pudieron originar en las chimeneas hidrotermales (figura 6.10) debido a que es probable que el ancestro más antiguo pudo ser un tipo de hipertermófilo que habitaba en estas regiones, pero el problema sigue siendo la generación de proteínas en ambientes acuosos (ver Apéndice D, sección D.2.2). También es posible que estos seres vivos, si bien no hayan sido los primeros, hayan sido los únicos sobrevivientes a una catástrofe masiva, como el bombardeo de meteoritos en la Tierra temprana. A favor de esta propuesta está el hecho que los primeros seres vivos colonizaron los mares y océanos antes que la superficie, ya que ésta última tenía elevados niveles de radiación UV.

También es posible que el origen de la fotosíntesis, haya sido un producto incidental

del sistema de detección termal que estos organismos *extremófilos*[14] utilizaban como termosensores, moléculas parecidas a la bacterioclorofila permiten la disposición óptima del organismo a ambientes con un gran gradiente de temperatura.

6.4. Panspermia

Panspermia (del griego $\pi\alpha\nu$; todo y $\sigma\pi\epsilon\rho\mu\alpha$; semilla) es la teoría que propone la existencia de ciertas "semillas" de la vida que se encuentran diseminadas por todo el Universo y que cada vez que encuentren las condiciones adecuadas darán origen a la vida. Entonces según esta hipótesis, el origen de la vida sobre la Tierra comenzó gracias a la llegada de tales semillas y su posterior desarrollo.

Aunque las primeras ideas de panspermia surgen en el siglo V a. de C. en algunas de las consideraciones del filósofo griego *Anaxágoras* (500 - 428 a. de C.), el término fue por primera vez propuesto en 1865 por el físico alemán *Hermann E. Richter* (1808 - 1876).

A partir del 1800, esta idea fue replanteada por *William Thomson* (Lord Kelvin) (1824 - 1907) y *Hermann von Helmholtz* (1821 - 1894). Durante la primera década del 1900 el químico y posterior premio Nobel *Svante Arrhenius* usó la palabra panspermia para explicar el comienzo de la vida en la Tierra.

Arrhenius siguiendo la lógica de Pasteur, consideró la posibilidad de que algunas esporas fueran sacadas de los pozos gravitacionales de los planetas por efectos electromagnéticos, y luego impulsados a través del espacio por la presión de radiación de las estrellas. Para partículas de tamaño bacterial, de unas cuantas décimas de micrómetros de radio, la fuerza producida por la presión de radiación de una estrella tipo Sol excede la gravedad. De esta forma nuestro planeta por ejemplo podría sembrar de vida el entorno del sistema solar.

En un gas muy tenue, como el que existe entre las nubes de gases interestelares, tales granos pueden llegar a velocidades de $\sim 100 \left[\frac{\mathrm{km}}{\mathrm{s}}\right]$, y podrían cruzar la distancia entre nubes en menos de ~ 100.000 años.

Desde 1960 Sir *Fred Hoyle* (1915 - 2001) y *Chandra Wickramasinghe* (1939 -) han apoyado la idea de la panspermia usando como herramienta la astronomía. Ellos, han afirmado incluso que las formas de vida continúan llegando a nuestra atmósfera y que pueden ser responsables de desencadenar epidemias, y las variantes necesarias para la macroevolución.

El problema con el modelo propuesto por Arrhenius para el transporte de las semillas, es la baja tasa de llegada de las semillas de vida a los planetas, debido principalmente a la misma presión de radiación que los expulsa del sistema planetario donde se originaron. Sin embargo, Hoyle y Wickramasinghe propusieron que si estas células se encontraran en la nube que formó el sistema solar podrían haberse mantenido casi intactos solo en la parte externa del sistema. En la parte interna del sistema solar las enormes temperaturas que alcanzan los planetas en formación y las hostilidades propias de la época de formación habrían hecho inviable la supervivencia de estos organismos. En los planetas más externos, tales como Urano y Neptuno, habría sido posible la proliferación de estos organismos, pues

[14] Al tipo particular de archeas que viven en ambientes altamente tóxicos para la mayoría de los seres vivientes, se les llama extremófilos, por ejemplo, se han descubierto algunos que viven en medios altamente ácidos como ácido sulfúrico, otro caso interesante son las bacterias que viven a bajas temperaturas en el hielo antártico.

en sus atmósferas las temperaturas pueden llegar a ser aptas y en ellas existe agua. Los organismos podrían ser expulsados del sistema planetario y ser interceptados e incorporados al material cometario. Cuando los cometas caen hacia el Sol y se acercan lo suficiente, el material cometario (incluyendo las células) sería arrojado al espacio interplanetario y, por el mecanismo explicado por Arrhenius, expulsada hacia el espacio interestelar; sin embargo, una pequeña fracción podría finalmente llegar a los planetas donde podrían proliferar en condiciones más aptas que la de los planetas externos.

Si bien es cierto que la panspermia podría dar respuesta al origen de la vida sobre la Tierra, no resuelve el problema inicial de cómo surgió la vida, ya que desplaza la problemática del origen a otro momento y lugar.

La panspermia propone que la vida podría surgir en muchos otros lugares tales como los planetas. La rápida aparición de la vida sobre la Tierra y nuestra ignorancia acerca de los procesos prebióticos, permiten plantear en primera instancia la Panspermia como alternativa.

Los elementos fundamentales para la vida, como el carbono, requieren tiempo para formarse al interior de las estrellas, de esta forma, si la panspermia fuera cierta, tendría que haber comenzado en algún momento reciente de la historia del Universo.

Suponemos que se requieren ciertas condiciones para la formación de estas primeras formas de vida, por ejemplo: densidad, temperatura y ionización. Dichas condiciones, en principio, serían más frecuentes en planetas que en las nubes de polvo.

En un famoso artículo Hoyle y Wickramasinghe consideran un número importante de enzimas fundamentales para los organismos vivientes terrestres, de ellas, consideraron unos diez lugares ocupados por aminoácidos que son de vital importancia para sus funciones catalizadoras. Sabiendo que la vida terrestre usa 20 aminoácidos, entonces el número de procesos experimentales que son necesarios para producir una sola enzima funcional supera los 20^{10}, y la probabilidad de encontrar al azar N enzimas funcionales sería de 20^{-10N}. De esta forma, el número de procesos excederá el número de todos los átomos que se encuentran en todas las estrellas del Universo entero, incluso antes de que lleguemos a $N = 100$. A partir de estas estimaciones ellos proponen tres conclusiones posibles:

a. La vida es un fenómeno cósmico, y estamos obligados en creer en la panspermia.

b. La vida es terrestre, pero esta información contiene enorme redundancia por un factor 20^{2000} para el caso de las enzimas.

c. La vida es terrestre. Ocurre con una minúscula probabilidad que es única para la Tierra.

Es importante mencionar, que los cálculos probabilísticos de Hoyle y Wickramasinghe no tienen en consideración como ocurren los procesos bioquímicos (las probabilidades son condicionadas o bayesianas), ya que las proteínas están en la naturaleza y no han ocupado para formarse el tiempo por ellos estimado. Más realista sería utilizar *algoritmos genéticos*[15] para ver en cuantas generaciones con mutaciones se podría lograr una molécula tipo enzima primordial.

[15] Los algoritmos genéticos son un conjunto de operaciones programadas que hacen evolucionar una población de individuos sometiéndola a cambios aleatorios semejantes a las que actúan en la evolución biológica (mutaciones y recombinaciones genéticas), así como también a una selección de acuerdo con algún criterio, en función del cual se decide cuáles son los individuos más adaptados, que sobreviven, y cuáles los menos aptos, que son descartados.

6.4.1. Evidencias y mecanismos

Durante la década de 1960 Hoyle y Wickramasinghe analizaban el espectro del polvo interestelar tratando de identificar su composición, y ante la insatisfactoria correspondencia entre los espectros teóricos y los observados propusieron que el espectro de absorción podía ser explicado adecuadamente no con la existencia de granos de grafito, sino empleando moléculas más ligadas a la biología. La confimación de esta idea llegó en 1968, ya que en el polvo interestelar fueron identificados hidrocarburos aromáticos policíclicos.

En 1974 Wickramasinghe demostró que en el espacio están presente polímeros orgánicos complejos, específicamente poliformaldehído. Estas moléculas están estrechamente relacionadas a la celulosa, la biomolécula más abundante de los seres vivos. Desde mediados de la década de 1970, Hoyle y Wickramasinghe se convencieron que los polímeros orgánicos constituían una parte importante del polvo interestelar, y aunque en su momento esta opinión fue considerada ciencia-ficción, en la actualidad esto ha sido confirmado. Hoyle y Wickramasinghe fueron más allá: intentando explicar una peculiaridad del espectro de luz proveniente de las nubes interestelares, concluyeron que ésta pudiese ser explicada suponiendo granos de polvo de cierto diámetro. Probaron de todo, sin obtener resultados satisfactorios, hasta que en 1979 usaron para sus simulaciones bacterias deshidratadas, que refraccionan la luz como esferas irregulares. La correspondencia obtenida es casi perfecta, de esta forma propusieron que los granos de polvo que componen las nubes interestelares podrían efectivamente ser bacterias deshidratadas y congeladas.

Esta conclusión es altamente controversial. Hoyle ya gozaba de fama de científico controvertido debido a sus convicciones cosmológicas (ver Capítulo 8, Volumen III). Esto, unido al éxito que ha tenido como escritor de romances de ciencia-ficción ha sido usado por sus detractores para invalidar el modelo. Sin embargo, en favor de Hoyle están sus contribuciones a la teoría de nucleosíntesis estelar (junto a William Fowler y Geoffrey Burbidge), además de la vasta lista de publicaciones que dan cuenta de la seriedad del modelo.

Aunque la idea de bacterias congeladas y deshidratadas en el espacio, puede parecer extraña, no es imposible. En noviembre de 1969 los astronautas de la Apollo XII trajeron algunas piezas de la *Surveyor 3*[16] de vuelta a la Tierra, entre ellas la cámara fotográfica. Una gran sorpresa causó encontrar dentro de la cámara, bacterias del tipo *streptococcus mitis*[17]. Estas habían sido llevadas por accidente en la Surveyor 3 permaneciendo en la Luna entre el alunizaje en Abril de 1967, y noviembre de 1969. Algunas muestras fueron enviadas al Centro para el Control y Prevención de Enfermedades de los EE.UU. en Atlanta, Georgia, e increíblemente pudieron ser cultivadas sin mayores inconvenientes. Es importante recordar que las condiciones de presión y de temperaturas en la superficie lunar son extremas y hasta ese momento no era esperado que pudiera sobrevivir allí algún tipo de organismo.

Por otra parte, se han hallado bacterias en la alta atmósfera a 41 [km] de altura en la estratósfera donde no se espera que se produzcan mezclas con capas atmosféricas inferiores. Independiente del origen de estos microorganismos (terrestre o extraterrestre),

[16]El Programa Surveyor fue el tercer y último programa norteamericano de sondas lunares automáticas con capacidad fotográfica, de análisis químico y excavación del suelo. Realizaron estudios fundamentales para hacer posible los alunizajes de las misiones Apollo.

[17]Streptococcus mitis es una especie que se encuentra en la boca, garganta, y la nasofaringe de seres humanos. Generalmente no son considerados patógenos, aunque han sido encontradas en dientes y senos con úlceras.

los resultados muestran que es posible el intercambio de organismos vivos desde o hacia planetas.

De esta forma, en principio la idea que las bacterias no sobrevivirían a las altísimas temperaturas y las fuerzas involucradas en un impacto contra la Tierra no puede ser descartada. Además, algunas especies extremófilas son capaces de soportar condiciones de radiación, temperatura y presión extremas que no permiten descartar que la vida pueda adquirir formas insospechadamente resistentes.

Siguiendo con esta idea, desde el 25 de julio del año 2001 y por unos diez días, raras lluvias de color rojo cayeron sobre la provincia de *Kerala*, en la India, aunque éstas se siguieron reportando esporádicamente hasta septiembre. La primera explicación proponía que una nube de tierra del golfo cercano producían el color rojo observado, sin embargo, *Godfrey Louis* y su alumno *A. Santhosh Kumar* analizaron muestras de dicha lluvia, reportando en 2003 la presencia de esporas de organismos quimiosintéticos. Estos organismos proliferan a temperaturas de 300 °C en condiciones similares a las hidrotermales, siendo de un nuevo tipo de hipertermófilos sin ADN. Ellos propusieron que estos organismos serían un nuevo dominio de vida primitiva con una genética termoestable alternativa. Adicionalmente, ha propuesto un origen extraterrestre a estos microorganismos. De esta forma, según ellos, la misteriosa lluvia roja de Kerala se debería a un aporte cometario de esporas rojas en la estratósfera sobre Kerala.

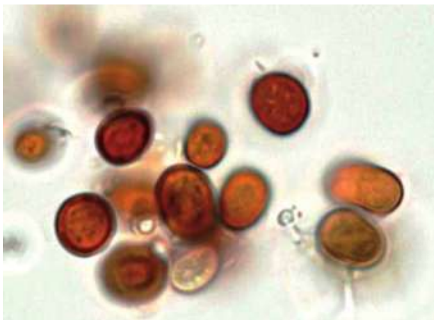


Figura 6.12: Células de las lluvias rojas. Créditos: Godfrey Louis.

Aunque el caso de los *streptococcus mitis* que sobrevivieron en la Luna mostró que es posible la supervivencia, aún hay escepticismo que ésta podría sobrevivir por tiempos prolongados a la radiación ionizante de las estrellas, por lo cual requeriría un blindaje que le protegiera de ésta. Esto se podría lograr por ejemplo en meteoritos o cometas. Un ejemplo de esto podría ser el meteorito marciano *ALH84001* (figura 6.21).

Entonces la vida se podría originar en diferentes lugares tales como planetas o satélites, los cuales serían "fuentes" que proveerían la vida a su entorno.

Francis Crick (que obtuvo el premio Nobel por el descubrimiento de la estructura del ADN) junto a Leslie Orgel (que fue uno de los que propuso el mundo del ARN), han propuesto en 1973 lo que se denomina la *panspermia dirigida*, esta consiste en que las semillas de la vida han sido diseminadas intencionalmente por una o varias civilizaciones extraterrestres avanzadas (civilizaciones de las cuales no existe ninguna prueba de su existencia), y que pequeños granos contenedores de ADN sería la mejor estrategia y de menor costo para diseminar la vida entre planetas vecinos.

Finalmente si la panspermia hubiese o no ocurrido, los seres humanos pueden involuntariamente ser portadores de vida a planetas y satélites vecinos con las distintas misiones (tripuladas y no tripuladas) pudiendo producir de forma involuntaria la panspermia. Las agencias espaciales tienen estrictos procedimientos para evitar este tipo de contaminación.

De acuerdo a los cálculos de Hoyle y Wickramasinghe, la Tierra recibe sobre 10^{18} células viables por año como el resultado de la deposición de material cometario en la parte alta de la atmósfera. A pesar de que una gran fracción de ellas perecería, de la pequeña fracción restante, algunas se adaptarían a las condiciones que localmente prevalecen en los distintos medio ambientes terrestres.

6.5. Principio antrópico

Si suponemos que se requieren condiciones físicas bien específicas para que se origine la vida, y puesto que existimos, podemos tener la certeza que nuestro Universo alberga las condiciones para que esto suceda. Este concepto, es conocido como el principio antrópico (del griego $\alpha\nu\theta\rho\omega\pi o$, hombre).

Existen dos formas del principio antrópico, una débil y una fuerte:

- La vida puede surgir y existir sólo en una pequeña época en la historia del Universo (principio antrópico débil).
- La vida puede surgir y existir sólo en un tipo especial de Universo (principio antrópico fuerte).

6.5.1. Principio antrópico débil

En 1938 *Paul Dirac* (1902 - 1984) observó que una cierta combinación de constantes fundamentales de la naturaleza daba como resultado la edad del Universo.

La combinación de constantes de Dirac es:

$$\frac{h^2}{c\ G\ m_p^3} \simeq 4,7 \cdot 10^{15}\ [s] \simeq 1,49 \cdot 10^8\ [a]$$

Donde h es la constante de Planck, c es la rapidez de la luz en el vacío, G es la constante de gravitación universal y m_p es la masa del protón.

En la actualidad la edad aceptada del Universo es $1,37 \cdot 10^{10}$ [a], unas cien veces el valor de Dirac, sin embargo, esta diferencia no le quita mayor validez a la idea de Dirac, a quien la aparente coincidencia entre un número basado en cantidades microscópicas (como la constante de Planck y la masa del protón) y otro basado en el Universo como un todo, no le resultaban fruto de la casualidad. Así sugirió una conexión entre ambas cantidades, pero como sabemos la edad del Universo cambia con el tiempo, de manera que si forzamos a que dicha razón sea igual a la edad del Universo, entonces el valor de las constantes universales debería variar.

En 1961 *Robert Dicke* (1916 - 1997), publicó en la revista *Nature* una explicación diferente. Existiría una "etapa apta" para la existencia de vida. Un Universo muy joven, no tendría el tiempo suficiente para acumular las cantidades suficientes de carbono interestelar generado por nucleosíntesis. En un Universo muy viejo, la gran mayoría de estrellas habrán pasado su etapa de secuencia principal y habrán dejado de brillar, sus sistemas planetarios por ende, si es que han sobrevivido, ya no serían habitables.

Así el principio antrópico débil, permite entender por qué el Universo tiene 13.700 millones de años, pues se requiere de unos 3.000 millones años para que las primeras estrellas se formen, otros 1.000 a 1.200 millones de años para que las supernovas arrojen suficientes elementos pesados que contaminen las nebulosas, de las que se formarán estrellas con planetas rocosos, como el Sol. Se requieren otros pocos miles de millones años para que las estrellas del tipo solar se estabilizen lo suficiente como para que pueda aparecer la inteligencia que puede medir la edad del Universo.

De esta forma, Dicke concluyó que la "etapa apta" para la vida ocurre cuando la edad del Universo tiene aproximadamente el mismo valor que el tiempo de vida de una estrella

promedio, lo que es muy cercano al valor obtenido por la combinación de constantes fundamentales de Dirac. Así, la similitud en los dos números (el microscópico y macroscópico) no sería una coincidencia, sino quizás un requisito para nuestra existencia. Lo propuesto por Dicke no requiere entonces que estas constantes fundamentales varíen con el tiempo. Muchísimo antes o muchísimo después de la época actual, la combinación de constantes fundamentales de Dirac no igualaría la edad del Universo, de esta forma no estaríamos allí para discutir dicha situación. La afirmación de Dicke correspondería a lo que en la actualidad denominamos *principio antrópico débil*.

6.5.2. Principio antrópico fuerte

Brandon Carter (1942 -) en 1968 dio otro enunciado de este principio, el que en la actualidad denominamos *principio antrópico fuerte* y que revisaremos a continuación.

En 1973 se celebró un congreso en Cracovia para celebrar el quinto centenario del nacimiento de Copérnico, y justamente cuando se celebraba el natalicio de la figura que quitó la Tierra del centro del Universo, Brandon Carter aparece afirmando que nosotros estamos en un lugar privilegiado, por el solo hecho de existir.

En aquella reunión usó por primera vez el nombre de principio "antrópico", teniendo aceptación inmediata, a pesar de ser un mal nombre ya que en realidad no tiene que ver con el *homo sapiens* sino que en general con seres inteligentes.

La idea de Brandon Carter nace de la suposición que la formación de vida requiere la existencia de planetas, los que a su vez requieren de la existencia de cierto tipo de estrellas. Carter se dió cuenta que para que existan este tipo de estrellas se requiere que los valores de las constantes fundamentales, como por ejemplo la constante de gravitación universal o la constante de estructura fina, estén limitados a un cierto rango.

Ciertamente, debido a que nosotros existimos, nuestro Universo tendría todas las constantes necesarias dentro de aquel rango.

Algunos han propuesto la hipótesis de los *multiversos*, en donde cada universo posee valores diferentes para las constantes universales. Así, nosotros seríamos producto de la existencia de este Universo, o invirtiendo la idea, *este Universo existe como es, ya que nosotros estamos aquí*. Ahora bien, no todos los universos serían estables, muchos de ellos no llegarían a vivir mucho tiempo pues colapsarían.

El problema de la hipótesis de los multiversos, es que estamos al filo de la ciencia pues estamos confinados en este Universo sin saber ni tener la posibilidad de confirmar la existencia de otros universos.

En 1986 *John Barrow* (1952 -) y *Frank Tipler* (1947 -) publicaron un libro titulado "*The Anthropic Cosmological Principle*", en el que proponen una formulación ampliada del principio antrópico propuesto originalmente por Brandon Carter en 1974.

Al menos, podemos estar seguros que algunas pequeñas variaciones de los valores de las constantes fundamentales haría que el Universo no fuera como lo conocemos.

A continuación detallamos algunos ejemplos dados por *Hugh Ross* (1945 -) acerca de la importancia de los valores de las constantes de nuestro Universo:

- *La constante de acople gravitacional*[18]: Si la fuerza gravitacional fuera levemente más intensa, la formación de las estrellas sería más eficiente y todas las estrellas serían

[18] La constante de acoplamiento gravitacional es una constante física fundamental que caracteriza la intensidad de la gravitación entre partículas elementales típicas. Dado que es una cantidad adimensional, su valor numérico es independiente de la elección del sistema de unidades.

más masivas que el Sol, superando el límite de Chandrasekhar. Estas estrellas en su fase de supernovas generan los elementos más pesados que el hierro, y diseminan los elementos más pesados que el berilio al espacio interestelar. Tales elementos son esenciales para la formación de planetas así como de seres vivos en cualquier forma, sin embargo, estas estrellas se extingen demasiado rápido y mantienen demasiado irregularmente las condiciones para la vida en los planetas circundantes a ellas. Las estrellas tan pequeñas como nuestro Sol son necesarias para esa condición.

Por otra parte, si la fuerza gravitacional fuera levemente más débil, todas las estrellas tendrían menos del 80 % de la masa solar. Aunque estas estrellas tienen periodos de vida como para mantener planetas aptos para la vida, ellas carecen de elementos pesados esenciales para la formación de tales planetas o la vida.

- *La constante de acople de la fuerza nuclear fuerte* (la que liga las partículas en el núcleo de un átomo, ver apéndice C): Si la fuerza nuclear fuerte fuera levemente más débil, los núcleos multi-protónicos no se ligarían. El hidrógeno sería el único elemento en el Universo. Si esta fuerza fuera levemente más intensa, el hidrógeno sería no solamente raro en el Universo, sino también la fuente de varios elementos más pesados que el hierro (elementos que resultan de la fisión de elementos muy pesados) aptos para la vida, sería escaso. De cualquier manera, la vida sería imposible[19].

- *La constante de acople de la fuerza nuclear débil* (que afecta el comportamiento de leptones, ver apéndice C): Los leptones forman una clase entera de partículas elementales (por ejemplo, neutrinos, electrones, y fotones) que no participan en reacciones nucleares fuertes. El efecto de interacción débil más familiar es la radiactividad, en particular, la reacción del decaimiento beta.

  La disponibilidad de neutrones a medida que el Universo se enfría, pasando por las temperaturas apropiadas para la fusión nuclear, determina la cantidad de helio producida durante los primeros minutos luego del Big-Bang. Si la constante de acople de la fuerza nuclear débil fuera levemente más intensa, los neutrones decaerían más fácilmente y por lo tanto estarían menos disponibles. De esto, poco o nada de helio sería producido por el Big-Bang. Sin el helio necesario, los elementos pesados necesarios para construir la vida no serían producidos en el interior de las estrellas. Por otra parte, si esta constante fuera levemente menor, el Big-Bang fusionaría más o incluso todo el hidrógeno en helio, con una subsecuente sobreabundancia de elementos pesados fusionados por las estrellas. Otra vez, la vida no sería posible.

  Un segundo equilibrio, posiblemente más delicado, ocurre para las supernovas. Al parecer, una oleada de neutrinos hacia el exterior determina si realmente una supernova es capaz de expulsar sus elementos pesados al espacio exterior. Si la constante de acople de la fuerza nuclear débil fuera levemente mayor, los neutrinos pasarían a

La expresión que la define:

$$\alpha_g = \frac{Gm_e^2}{\hbar c}$$

donde G es la constante de gravitación universal, m_e es la masa del electrón; c es la velocidad de la luz en el vacío y $\hbar$ es la constante de Planck dividida por 2π.

[19]La fuerza nuclear fuerte en realidad está equilibrada mucho más delicadamente. Un aumento tan pequeño como el dos por ciento provocaría que los protones nunca se formasen a partir de quarks (ver Apéndice C). Una disminución similar significaría que ciertos elementos pesados esenciales para la vida serían inestables.

través de las capas externas de la supernova sin turbarla. Por lo tanto, seguirían en su núcleo los elementos pesados producidos por la supernova. Si la constante fuera levemente menor, los neutrinos no serían capaces de arrojar al espacio las capas que rodean al núcleo. Una vez más los elementos pesados esenciales para la vida seguirían atrapados para siempre dentro de las cenizas de las supernovas.

- *La constante de acople electromágnetica* (que liga electrones con protones para formar lo átomos): Las características de las órbitas de electrones en torno a los átomos determinan el grado con que los átomos podrán o no, formar moléculas. Si la constante de acople electromágnetica fuera levemente menor, no mantendría electrones en órbitas alrededor de núcleos. Si fuera levemente mayor, un átomo no podría "compartir" una órbita del electrón con otros átomos. De cualquier manera, las moléculas y por lo tanto la vida, serían imposibles.

- *La razón entre la masa del electrón y la masa del protón* también determina las características de las órbitas electrónicas en torno de los núcleos. Un protón es 1836,2 veces más masivo que un electrón. Si la razón de masas electrón/protón fuera levemente mayor o levemente menor, otra vez, las moléculas no se formarían y la vida sería imposible.

Sin embargo, Hugh Ross va más allá y sus argumentos incluyen ligeras variaciones (que no detallaremos aquí) de la tasa de expansión, el nivel de entropía, la masa, energía y la uniformidad del Universo, la estabilidad del protón, las constantes de estructura fina, la rapidez de la luz en el vacío, la distancia entre las estrellas, entre otras.

6.6. Vida en ambientes extremos

En 1935 se descubrió que ciertas bacterias son capaces de convertir dióxido de carbono en sustancias orgánicas similares a las realizadas en la fotosíntesis de las células vegetales, pero sin la necesidad de energía lumínica. Ésta es reemplazada por la generada en la oxidación de sustratos minerales puramente inorgánicos. Este proceso es denominado *quimiosíntesis*. La quimiosíntesis es ampliamente usada en hábitats en los cuales la radiación solar no llega.

Los análisis filogenéticos del microbiólogo *Carl Woese* (1928 -) en 1977 le llevaron al descubrimiento de un nuevo dominio, el *archaea*. Así, la clasificación más aceptada en la actualidad de los seres vivos es un árbol que está separado en tres dominios diferentes: *eubacterias*, *archaea* y *eucariontes*.

Las *eubacterias* o simplemente bacterias son organismos unicelulares y se clasifican como procariontes (*πρό*; antes, *κάρυον*; núcleo), es decir, sin una membrana nuclear. Esto les hace organismos simples, metabólicamente hablando, y al mismo tiempo, con grandes adaptaciones a medios extremos donde la quimiosíntesis permite mantener la vida. Por ejemplo, muchas bacterias en el fondo oceánico usan la quimiosíntesis como forma de producir energía, debido a que la completa ausencia de radiación solar impide la fotosíntesis. Estos microorganismos son la fuente básica de alimentación para otros organismos del fondo oceánico.

Los *eucariontes* son organismos caracterizados por poseer células con un núcleo rodeado por una membrana.

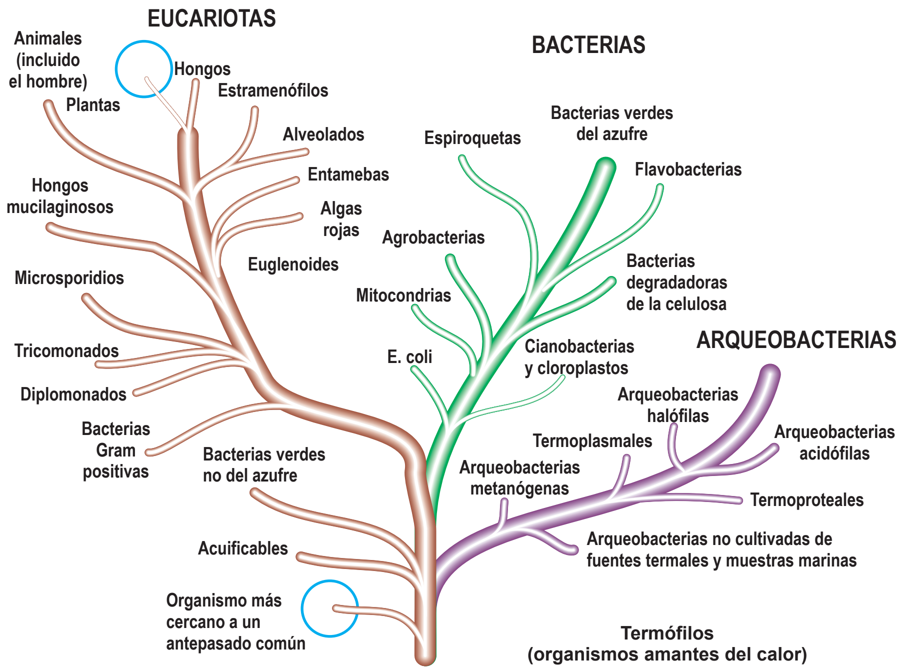


Figura 6.13: Árbol de los seres vivos, donde se pueden visualizar los tres dominios: arqueas, bacterias y eucariontes.

Los *archaea*, arqueas o también *arqueobacterias* son procariontes distintos a las bacterias. Su nombre significa antiguo, ello es, porque se creyó que son anteriores a las bacterias, debido a que viven en ambientes que poseía la Tierra primitiva. Poseen características que comparten con las bacterias y los eucariontes. Por ejemplo, al igual que las bacterias poseen filamentos, espirales y aspecto de bacterias. Las archaea comparten genes con las bacterias, pero también poseen genes únicos. Algunas bacterias y las archaeas evolucionaron en los ambientes que poseía la Tierra primitiva, pero millones de años después los eucariontes evolucionaron de los archaea, y aunque estos parecen bacterias, en realidad son más cercanos a los eucariontes.

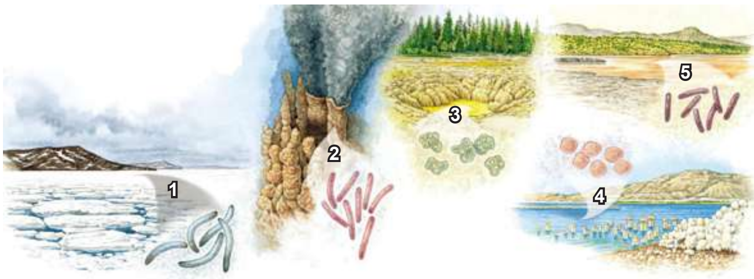


Figura 6.14: Arqueas extremófilas: 1. Hielo (psicrófilas): Polaromonas vacuolata. 2. Profundidad oceánica (termófilas e hipertermófilas): Methanopyrus kandleri. 3. Lagunas de azufre (acidófilas): Sulfolobus acidocaldarius. 4. Lagunas de soda (alcalófilas): Natronobacterium gregoryi. 5. Salares (halófilas): Haloferax volcani. Créditos: Roberto Osti ilustraciones.

Existen microorganismos que viven en medios que para otros serían mortales, por ejemplo, existen bacterias que viven en medios altamente ácidos tales como ácido sulfúrico; se han descubierto microorganismos viviendo en lagunas ácidas como las del Parque Nacional de Yellowstone en EE.UU. En 1977 se descubrieron en el fondo oceánico las grietas o *chimeneas hidrotermales* (figura 6.10) donde se han encontrado organismos viviendo hasta 10.800 metros de profundidad a $\sim$ 350 °C y más de 300 atmósferas de presión. Otro caso interesante son las bacterias que viven a bajas temperaturas en el hielo antártico.

Un *extremófilo* es un ser vivo que vive en condiciones extremas, entendiéndose por tales aquéllas que son muy diferentes a las que nosotros vivimos. La mayor parte de los extremófilos son microrganismos, arqueas procariontes y eucariontes. Su pequeño tamaño y el hecho de que su metabolismo es muy adaptable ha permitido que colonicen ambientes que son mortales para otros seres pluricelulares, aunque existen extremófilos pluricelulares, como por ejemplo los barófilos.

Existe una gran variedad de extremófilos, algunos de ellos son los siguientes:

- *Anhidrobiosis*: sobreviven a una pérdida casi completa del agua. Ejemplo: Selaginella lepidophylla.
- *Acidófilo*: se desarrollan en ambientes de alta acidez.
- *Alcalófilo*: se desarrollan en ambientes muy alcalinos (básicos).
- *Barófilo*: Se desarrollan en ambientes con presión muy alta.
- *Halófilo*: Se desarrollan en ambientes hipersalinos.
- *Organismo de suelos profundos*: Viven a muchos metros bajo el suelo, incluso en medio de rocas.
- *Psicrófilo*: Se desarrollan en ambientes de temperatura muy baja.
- *Radiófilo*: Soportan gran cantidad de radiación.
- *Termófilo*: Se desarrollan en ambientes a temperaturas superiores a 45 °C, algunos de ellos, los hipertermófilos tienen su temperatura óptima de crecimiento por encima de los 80 °C.
- *Xerófilo*: Se desarrollan en ambientes con muy baja humedad (Xerox del griego seco).

El descubrimiento y estudio de vida en condiciones extremas, es el laboratorio que tenemos para tratar de analizar cómo y bajo que condiciones se pudo originar la vida en la Tierra y la posible existencia de vida en ambientes extremos en otros mundos que podrían ser muy parecidos a estos ambientes extremos de la Tierra.

6.7. Habitabilidad planetaria

Denominamos *zona habitable* de un sistema planetario a aquella zona que podría albergar planetas y/o satélites tipo rocosos, en los cuales pudiese existir, bajo ciertas condiciones, agua en estado líquido.

La gran cantidad de características físico-químicas del agua hacen creer, casi sin discusión, que es el solvente biótico principal de los planetas habitables.

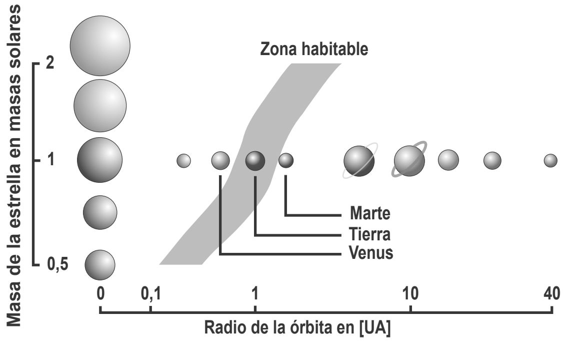


Figura 6.15: Zona de habitabilidad planetaria para distintas estrellas. Se encuentran representados los planetas del sistema solar en el lugar que le corresponde al Sol. Adaptada con el permiso de Annual Review of Astronomy and Astrophysics, Volume 41 © 2003 de Annual Reviews, http://www.annualreviews.org.

Como mencionamos anteriormente, que un planeta se encuentre en la zona de habitabilidad, no asegura que ese planeta lo sea realmente, pues no conocemos cabalmente cuales son las condiciones adicionales que debe cumplir un planeta para que sea habitable, aunque tenemos ciertos indicios. Suponemos que para que un planeta sea habitable es fundamental:

- Que orbite en torno a una estrella con cierta metalicidad, masa, temperatura y estado evolutivo.
- Que el planeta o satélite sea de tipo rocoso.
- Que tenga la masa suficiente para mantener una atmósfera estable.
- Que exista agua en estado líquido.

Suponemos que la vida requiere de una fuente de energía que puede ser otorgada en primera instancia por una estrella o en segunda instancia por la energía térmica del interior del planeta o satélite. Esto último significaría que en principio podrían existir planetas habitables en zonas más externas a la zona de habitabilidad.

Las estrellas que podrían tener en su sistema, planetas o satélites con temperaturas adecuadas, deben ser estrellas de segunda generación con temperaturas efectivas que van entre los 4.000 [K] y los 7.000 [K]; el Sol posee 5.800 [K] muy cerca del punto medio de estos límites. Estrellas más calientes viven poco en escalas de tiempo astronómicas.

Suponemos que los planetas habitables son de tipo rocosos y con rangos de masa comprendidos entre 0,5 y 10 masas terrestres. Este rango está acotado, debido a que si los planetas son muy pequeños, tienden a perder demasiado rápido sus atmósferas, y si son muy masivos retendrán gases livianos, teniendo atmósferas más similares a las que poseen planetas de tipo gaseoso, y no contamos aún con modelos que predigan el origen de la vida en este tipo de planetas, en realidad, no tenemos modelos que predigan la aparición de vida en ningún lugar. No se puede descartar completamente que la vida pueda evolucionar en las nubes superiores de los planetas gigantes, tal como lo propusiera Carl Sagan en la popular serie y libro "Cosmos", pero los modelos de origen de seres vivos en la Tierra no han considerado aún, un posible origen en la atmósfera. Por otra parte, los satélites de los planetas gaseosos podrían tener las condiciones necesarias para albergar vida.

Además de los factores que suponemos fundamentales, existen otros factores que suponemos importantes, mas, no sabemos si pueden llegar a ser fundamentales, entre ellos:

- La existencia de corrientes convectivas en el interior.
- Poseer un núcleo líquido (o parte de él) de metales conductores.
- Que posea un compañero de gran tamaño que mantenga la inclinación del eje de rotación relativamente estable.
- Que sus órbitas tengan excentricidades pequeñas.

Las corrientes convectivas parecen ser particularmente importantes. En la Tierra producen la tectónica de placas y la actividad volcánica que aporta materiales tanto a la corteza como a la atmósfera. En particular permite la existencia de ciertos "ciclos" como el ciclo del carbono.

Por otra parte, las corrientes convectivas en el núcleo metálico conductor de electricidad son necesarias, según el modelo del dínamo, para generar el campo magnético terrestre.

El campo magnético protege al planeta del viento estelar, que tiende a despojarlo de su atmósfera y bombardearlo con radiación ionizante letal para la vida.

Al parecer, el núcleo metálico conductor solo se ha formado debido al pasado catastrófico de nuestro planeta, el cual permitió que los materiales de dos protoplanetas generaran

un gran núcleo metálico. Además la posterior formación de una gran Luna permitiría a la Tierra mantener el eje de rotación de la Tierra relativamente estable, permitiendo a la vida adaptarse a las lentas fluctuaciones de éste. Además, las intensas fuerzas de marea harían que vastas zonas pudieran ser bañadas por las aguas, generando zonas de bajas profundidades donde se pudieron dar las condiciones para el origen de la vida. Si todo esto resultara fundamental, no bastaría con tener planetas rocosos en la zona habitable, sino que también se requeriría que tuviera una historia similar a la de la Tierra.

Para que se forme un núcleo de metales líquido (suponiendo que existen los materiales para formarlo) se requiere que el planeta sea lo suficientemente masivo de forma que no se enfríe muy rápidamente, dando tiempo para que los materiales confluyan al centro. La descomposición de los elementos radioactivos en el núcleo de un planeta es fundamental para su calentamiento interior. Esto mismo podría ser fuente de energía en planetas extrasolares.

Existe otra forma de generar el calor interno; el calentamiento mareal que ocurre en algunos satélites de los planetas gaseosos. Io, satélite de Júpiter, posee un núcleo que es lo suficientemente caliente, producto de las fuerzas de marea, para ser volcánicamente activo.

Por otra parte, si el planeta no rota lo suficientemente rápido no produciría el efecto de dínamo dentro de su núcleo, no permitiendo que el campo magnético sea lo suficientemente intenso. Sin embargo, en algunos de los satélites de los planetas gaseosos podrían generar un campo magnético al cortar las líneas del campo magnético del planeta gaseoso.

La inclinación de la Tierra varía entre 21,5 y 24,5 grados en 41.000 años (ciclo de Croll-Milankovitch). Una variación más drástica, o un período mucho menor, inducirían cambios climáticos como variaciones en la severidad de las estaciones.

Otro factor importante en la severidad de las estaciones es la excentricidad orbital. Cuanto más excéntrica la órbita, mayor es la fluctuación de la temperatura en la superficie de un planeta. No sabemos si la vida se puede originar si las fluctuaciones de temperaturas sobrepasan el punto de congelación y/o el punto de ebullición del agua. Por otra parte, si se hubiese originado en estas condiciones tan extremas, hay que considerar que los seres vivos en la Tierra han mostrado una enorme adaptabilidad. Sin embargo, hay que además considerar que en general los organismos multicelulares con diferenciación celular, son más sensibles a las variaciones de temperaturas.

Si la hidrósfera terrestre se evaporara y congelara alternativamente tal vez la química prebiótica requeriría tiempos mucho mayores.

6.8. Búsqueda de vida extraterrestre

La posibilidad de la existencia de seres vivos extraterrestres es algo que ha fascinado la mente del ser humano durante los últimos siglos. La comprobación de la existencia o no existencia de ésta, es algo que trasciende a todos los ámbitos del quehacer humano.

La búsqueda de vida extraterrestre es una labor que necesariamente debe ser abordada desde la ciencia. Para ello, resulta fundamental el conocimiento adquirido sobre el origen y evolución de la vida en nuestro propio planeta, ya que es el único patrón de comparación válido para la búsqueda de vida en otros mundos.

La rápida aparición de vida sobre la superficie de la Tierra, nos lleva a pensar que ésta debe aparecer con cierta facilidad, luego la evolución darwiniana se encargaría de hacer aparecer la inteligencia, con ello la civilización, las ansias de conocer y explorar. El

razonamiento que acabamos de hacer, es extremadamente simplista y posee una larga lista de inconvenientes, pese a ello, se encuentra altamente extendido.

La ciencia y la gente de ciencia, usa el método científico, que aunque lento, ha resultado tremendamente exitoso durante los cuatrocientos años que se ha estado usando: primero se observa la naturaleza y sus fenómenos, luego se construyen modelos, llamados teorías científicas, que son realimentados por la observación sistemática de la naturaleza y sus fenómenos.

Dado que la unicelularidad precede necesariamente, en cualquier hipotético árbol de la vida, a la pluricelularidad, y que el surgimiento de organismos unicelulares no asegura la aparición de organismos multicelulares, se puede suponer que es más probable que exista vida a nivel microscópico que formas de vida que hayan desarrollado inteligencia.

Debido a esto, la ciencia busca vida a nivel microscópico, principalmente bacterias y trazas de residuos bacterianos o fósiles en nuestro entorno del sistema solar. Sin embargo, dado que no es posible desechar la existencia de seres extraterrestres inteligentes, la ciencia también busca posibles señales de vida inteligente a través de radiotelescopios usados por el proyecto SETI. Hasta el momento (año 2012) no se ha detectado ninguna señal confirmada, de origen extraterrestre.

Por otra parte, el desarrollo de técnicas que permiten descubrir planetas extrasolares, junto con el avance de la tecnología de construcción de telescopios, desarrollo de detectores y las técnicas de interferometría, nos abren una nueva vía de investigación: la búsqueda de trazas de la vida en las atmósferas de planetas extrasolares. La atmósfera de un planeta puede ser estudiada a través de la luz, que proveniente de su estrella huésped, la atraviese, trayendo información valiosa acerca de la composición química de ella, pues cada elemento que compone dicha atmósfera deja una huella espectral única (ver Apéndice C).

En particular, si un planeta extrasolar pasa frente a su estrella desde nuestra línea de visión, podremos estudiar su espectro y buscar las trazas de elementos asociados a la vida como la conocemos. Sin embargo, de todo el universo de planetas que pasan frente a su estrella desde nuestro punto de visión, los más interesantes son aquellos que se encuentren en una región tal que les permita mantener el agua en estado líquido, es decir, que dicho planeta se encuentre en la denominada "zona de habitabilidad". Obviamente, como hemos visto, que un planeta se encuentre en dicha zona, no asegura que sea habitable. Sin embargo, esto no es un inconveniente para el análisis de los espectros de transmisión.

6.8.1. Ovnis, extraterrestres y ufología

Es común que al hablar de "vida extraterrestre" las personas se imaginen pequeños seres grises con grandes ojos y cabezas. Estos seres "tendrían" un grado de evolución mayor que el nuestro Esto último, de acuerdo a nuestra definición de evolución, no tiene ningún sentido.

No siempre los supuestos extraterrestres han tenido estas caracterizaciones, pues eran diferentes hace 50 o 100 años. La estandarización de éstos se debe principalmente a la influencia que ejercen los medios de comunicación. Los reportes hace 50 años no eran tan coincidentes entre sí como los más recientes.

La ciencia ficción está tan incorporada a nuestra cultura, que muchas veces las personas no son capaces de discernir entre ésta y "la realidad".

Resulta frecuente el avistamiento de los populares OVNIs (objetos voladores no identificados). Estos avistamientos, a diferencia de las creencias populares, son completamente

normales y casi seguramente todos en algún momento de nuestras vidas hemos visto algún OVNI, pues OVNI puede ser casi cualquier cosa. Por una parte el desconocimiento de los objetos y los fenómenos que ocurren en el cielo, sumado a la gran influencia de los medios de comunicación hace que las personas se inclinen mayoritariamente en aceptar la opción menos plausible de todas; que tienen que ver con naves extraterrestres. El desconocimiento hace que no se identifiquen aviones de pruebas, helicópteros, destellos producidos por satélites artificiales, cohetes espaciales, pruebas militares, etc., pasando automáticamente a convertirse en OVNIs. Pero una cosa es la existencia de OVNIs y otra muy distinta es que estos OVNIs sean de naturaleza extraterreste. Los astrónomos por ejemplo, prácticamente nunca ven OVNIs.

Si estos seres extraterrestres que vuelan naves espaciales en nuestro planeta existen, no se han hecho presente a nuestra sociedad, excepto a un puñado de personas "elegidas" que no han podido demostrar sus historias. La televisión ha fomentado ideas absurdas como la de los complots de ciertos entes, ciertos gobiernos, ciertas instituciones tanto civiles como militares, y tampoco los científicos se han librado de dichas imputaciones, ya que muchas personas creen que los científicos también ocultan información a la sociedad.

La ufología u ovnilogía, la pseudociencia que se ocupa de estudiar el fenómeno, en general no usa el método científico, por lo que *no es una ciencia*, y las que denominan "teorías" son solo hipótesis, en su gran mayoría incorrectas.

Dejaremos los temas como complots y naves tripuladas por seres extraterrestres para series de televisión. Nos dedicaremos ahora a abordar el tema de la vida extraterrestre desde el punto de vista de la ciencia.

6.8.2. Búsqueda de vida en el sistema solar

6.8.2.1. Búsqueda de vida en Marte

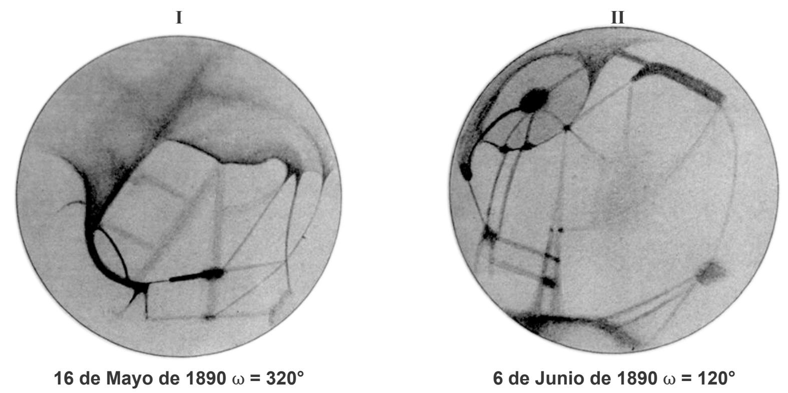


Figura 6.16: Dos dibujos de Marte hechos por Schiaparelli en base a sus observaciones del 16 mayo de 1890 (a la izquierda) y del 6 de septiembre de 1892 (a la derecha).

El astronomo italiano *Giovanni Schiaparelli* (1835 - 1910), observó Marte sistemáticamente entre las oposiciones de 1877 y 1890. Al momento de sus primeras observaciones, Schiaparelli era ya un astrónomo famoso, había descubierto el asteroide (69) Hesperia, y explicó la naturaleza de las estrellas fugaces. Las precisas observaciones de Marte le permitieron apreciar nuevos mares, islas y continentes, además señaló la presencia de formaciones regulares que se parecían a canales. Publicó sus observaciones en 1878 como "*Osservazioni astronomiche e fisiche sull'asse di rotazione e sulla topografia del pianeta Marte fatte nella Reale specola in Milano*". El término "*canali*" había sido utilizado en 1859, por el jesuita *Angelo Secchi*. Aunque Schiaparelli, inicialmente, asoció los canales a

formaciones de tipo natural, consideró posteriormente la posibilidad que fueran de naturaleza artificial. Los trabajos de Schiaparelli llevaron a la hipótesis de vida inteligente en Marte debido a una incorrecta tradución de estos al inglés; se tradujo la palabra "*canali*" como "*canals*" en cambio de "*channels*". La primera palabra indica una construción artificial mientras la segunda indica correctamente una conformación del terreno que puede ser también natural.

La interpretación errada de la palabra *canali* llevo a la idea que estos canales eran de origen artificial, construidos por seres inteligentes, que debían tener un gran avance tecnológico para desarrollar monumental obra de ingeniería. Sin duda todas esas creencias estaban fuera del ámbito de la ciencia. Comenzando el siglo XX, el matemático y millonario norteamericano *Percival Lowell* (1855 - 1916) motivado por la existencia de canales, auspició la construcción del observatorio más grande del mundo para estudiarlos, equipando el observatorio con los mejores telescopios y muy buenos astrónomos. La astronomía realizada en el observatorio Lowell contribuyó enormemente a la astronomía, incluyendo el descubrimiento de Plutón (Capítulo 5, subsección 5.1.1).

Finalmente, la polémica sobre los canales terminó definitivamente en 1965, cuando la sonda espacial *Mariner 4* envió por primera vez una serie de imágenes del planeta, en las cuales el paisaje marciano no sólo no mostraba los famosos canales, sino que se presentaba árido y carente de vida, mostrando sin embargo, la existencia de lechos de ríos secos.



Figura 6.17: La Viking 2 se posó sobre la superficie marciana el 7 de agosto de 1976, en un altiplano del hemisferio septentrional llamado Utopía. En la imagen se puede observar el lugar de donde se sacó una muestra de suelo con el brazo robótico. Créditos: Mary A. Dale-Bannister, Washington University in St. Louis.

La posibilidad de la existencia de agua bajo la superficie, sumado a la hipótesis de la existencia de organismos vivos microscópicos, hizo que a comienzos de la década de 1970 se planearan las misiones *Viking*, formadas por un "*orbiter*" y un "*lander*", estos últimos descendieron sobre la superficie en 1976. Las *Viking* excavaron y analizaron el suelo tanto bajo el perfil geoquímico, como biológico. Los resultados de las dos sondas *Viking* fueron bastante desalentadores; la atmósfera marciana es irrespirable (compuesta por un 95 % de dióxido de carbono, un 2 % de nitrógeno y pequeñas cantidades de otros gases como argón, monóxido de carbono, oxígeno) y muy poco densa, ejerciendo una presión atmósferica en la superficie del planeta de unos 7,5 milibares. Las bajas presiones atmosféricas impiden la existencia de agua en estado líquido. El único estado físico del agua compatible con la presión en la superficie marciana es el hielo, es por ello que existen casquetes polares, y están posiblemente formados por una mezcla de hielos de agua y de dióxido de carbono.

Cada *lander* estaba dotado de un brazo mecánico capaz de recoger muestras del suelo y depositarlas en cinco contenedores dedicados a diversos experimentos: dos para el análisis de química orgánica e inorgánica; los otros tres para la búsqueda de microorganismos. Uno de estos experimentos era medir el intercambio gaseoso entre muestras de la superficie y atmósfera en presencia de nutrientes orgánicos terrestres. Otro de estos experimentos llevó sustancias nutritivas marcadas con isótopos radioactivos. Si hubiesen existido formas de vida que las pudieran ingerir podrían liberar CO_2 radioactivo. Un tercer experimento expuso el suelo marciano a CO y CO_2 radiactivo

con la finalidad de observar si algún organismo los incorporaba.

Aunque en un principio los resultados eran coincidentes con la existencia de vida en Marte; ya que hubo intercambio de gases, el material orgánico se oxidó y el dióxido de carbono se incorporó al suelo. No se encontraron moléculas orgánicas a través del análisis por espectrometría de masas en la superficie. Los resultados anteriores tuvieron otras explicaciones: existen compuestos químicos que oxidan el suelo. Estos oxidantes son generados por la radiación ultravioleta. Tras cuatro experimentos hechos en diferentes lugares de la superficie del planeta la conclusión es que Marte actualmente no posee vida, al menos, en las zonas analizadas.

A propósito de las misiones *Viking*, me desviaré un momento del tema para comentar una famosa fotografía tomada por la *Viking Orbiter I* por primera vez el 25 de julio de 1976 de una zona denominada *Valle de Cidonia* (figura 6.18) y que generó una gran controversia, pues aparece una figura que asimila una cara. Antes de asumir que esta es realmente una cara recordemos, como vimos cuando hablamos de las constelaciones (Volumen I, sección 2.2), que es parte de la naturaleza humana la identificación de patrones.

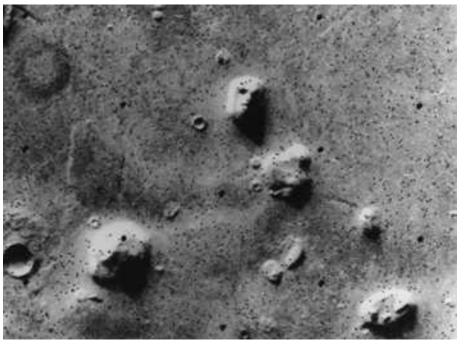


Figura 6.18: Imagen tomada en 1976 del valle de Cidonia por la Misión Viking. Créditos: The Viking Project, NASA.

Rápidamente se generaron una serie de hipótesis no científicas acerca de un posible origen extraterrestre, pero posteriores misiones de la NASA y ESA han vuelto a fotografiar en 1998, 2001, 2002 y 2006 la misma zona pero bajo diferentes condiciones de iluminación y con una resolución mucho mayor. Las imágenes (ver figuras 6.19 y 6.20) muestran una formación natural que nada tiene que ver con extraterrestres.

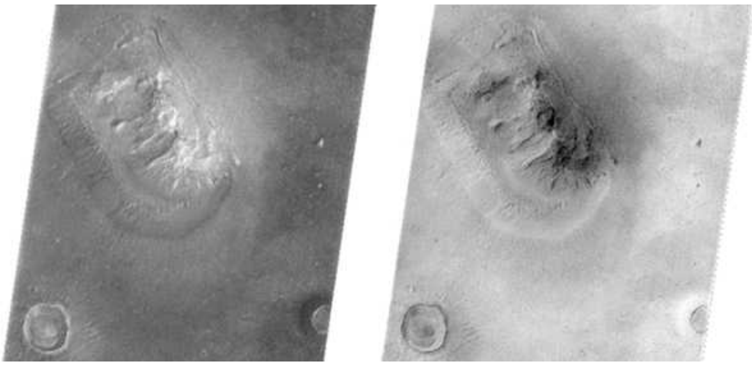


Figura 6.19: Imágenes tomadas en abril de 1998 por la Mars Global Surveyor. Créditos: NASA.

La existencia de océanos en el pasado remoto y de agua bajo la superficie marciana permite mantener la esperanza de que aún puedan existir microorganismos bajo la superficie, aún después de los resultados negativos obtenidas por las *Viking*.

En la actualidad solo podrían tener un posible origen biológico extraterrestre los *cristales de magnetita en forma de cadenas* observados en la roca (figura 6.23). En la Tierra, la magnetita se forma abióticamente siempre en forma de rocas. Los pequeños cristales químicamente puros y sin defectos sólo son producidas biológicamente, por las *bacterias magnetotácticas* (figura 6.24). Estas bacterias forman una pequeña membrana que controla el crecimiento alrededor del cristal, y entonces bombean átomos de hierro hacia adentro de la membrana y forman estos cristales (que consisten de átomos de hierro y oxígeno). Controlando cuidadosamente el crecimiento del cristal con la membrana, las bacterias impiden que los cristales crezcan en una dirección y les permiten crecer en otra.

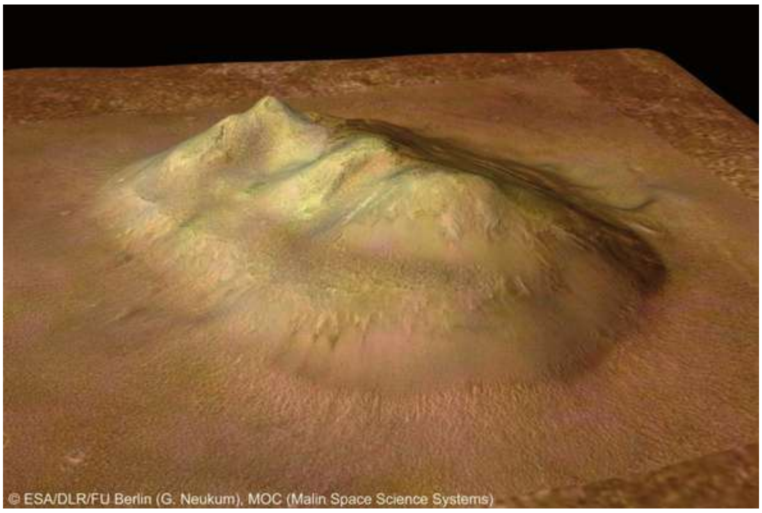


Figura 6.20: Imagen construida gracias a fotografías de alta resolución obtenidas por la sonda Mars Express de la ESA. Créditos: ESA/DLR/FU Berlin (G. Neukum), MOC (Malin Space Science Systems).

La dirección en la que la bacteria elonga los cristales maximiza la fuerza magnética de la magnetita. Las bacterias que son mayoritariamente del *genus Magnetospirillum*, alinean varios de estos cristales para que actúen colectivamente como una barra magnética, que permite a la bacteria alinearse con el campo magnético de la Tierra.

Algunas bacterias magnetotácticas usan el campo magnético terrestre para encontrar en el agua, el contenido correcto de oxígeno. Generalmente, las diferentes concentraciones de oxígeno en el agua están ordenadas en capas horizontales. Las líneas del campo magnético de la Tierra, en general, entran formando un ángulo vertical con el suelo. Así las líneas inclinadas ayudan a las bacterias a explorar las diferentes capas.



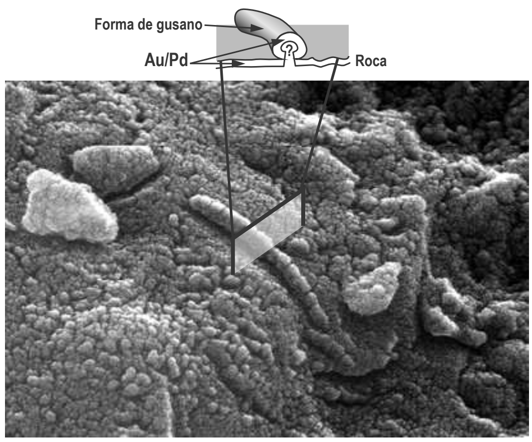
Figura 6.21: La controversia de la vida en Marte se reinició con el descubrimiento en 1996 en el meteorito marciano ALH 84001, que mostraba evidencias de la posible existencia de vida en un pasado remoto. Créditos: NASA.

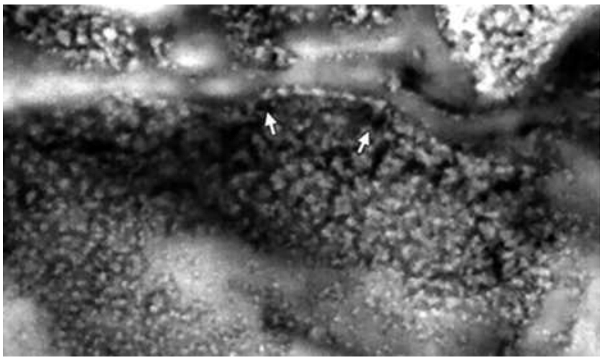
Se estima que cerca de una cuarta parte de los cristales de magnetita en el meteorito serían del "tipo biogénico". Las restantes tres cuartas partes se asume que se formaron geológicamente.

Pero ¿qué utilidad podría tener para bacterias marcianas las cadenas de magnetita sin un campo magnético apreciable?

La *Mars Global Surveyor* detectó magnetismo remanente intenso en algunas rocas de la corteza marciana (figura 5.33). Por lo cual resulta factible que hace cerca de 3.900 millones de años Marte tuviera un intenso campo magnético, que es justamente cuando se

Figura 6.22: Forma de gusano fotografiada de ALH84001, tiene dimensiones de 380 [nm] de largo y ha sido comparada con nanobacterias terrestres (fósiles) encontradas en Washington a 400 [m] de profundidad. Arriba a la derecha, el modelo que explica el objeto tipo gusano, este sería producto de la capa de Au/Pd que se usa para recubrir muestras para poder observarlas con el microscopio electrónico. Se estima un grosor promedio de ~ 7 [nm] para esta capa. Así la bacteria que lo habría formado, tendría solo 6 [nm] de diámetro y no se conocen bacterias con estas dimensiones. Créditos: NASA.





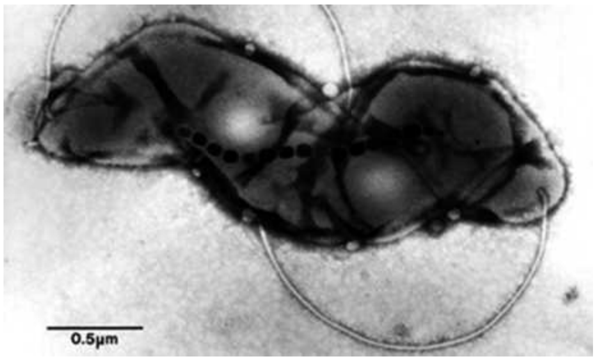


Figura 6.23: La fotografía corresponde a cristales de magnetita y cadenas de cristales de magnetita en el meteorito Marciano ALH84001. Una cadena visible está indicada con flechas. El diámetro promedio de un cristal es cercano a treinta millonésimas de milímetro. Créditos: NASA Ames Research Center.

Figura 6.24: La fotografía muestra una bacteria magnetotáctica. Se puede visualizar por el centro de la bacteria una cadena de cristales de magnetita. Créditos: Dr. Dennis A. Bazylinski.

piensa fueron formadas estas magnetitas.

En mayo de 2007 el robot explorador *Spirit* encontró por casualidad, al remover la arena del suelo con una de sus ruedas rotas, una zona rica en dióxido de silicio que en la Tierra está siempre asociado a microorganismos. La abundancia del dióxido de silicio en ese lugar puede deberse a que el lugar haya albergado un *géiser* o *fumarola*. En la Tierra ambos fenómenos son propicios para el desarrollo de vida bacteriana.

6.8.2.2. Titán: una posible Tierra prebiótica

Tal como vimos en el capítulo anterior, Titán, es el satélite más grande de Saturno y el segundo satélite más grande del sistema solar, y es el único satélite del sistema solar que cuenta con una atmósfera significativa. La presión atmosférica en la superficie es de $\sim 1{,}5$ veces la de la Tierra a nivel del mar, y aunque la atmósfera es más densa que la Tierra, el efecto invernadero es más débil.

La atmósfera de Titán, se supone muy similar a la atmósfera primitiva de la Tierra en tiempos prebióticos, pero debido a la baja temperatura superficial (-180 °C) las reacciones químicas son extremadamente lentas y debido a las reacciones químicas que allí se están produciendo es probable que nunca se llegue a originar la vida mientras que el Sol se encuentre en la secuencia principal. Algunos creen que en un futuro lejano, cuando el Sol se convierta en una gigante roja, Titán alcanzaría temperaturas adecuadas para acelerar las reacciones químicas prebióticas.

Las temperaturas en Titán son lo suficientemente bajas como para que el metano y el etano se encuentren en estado líquido, y dado que el gradiente de temperatura de la tropopausa es bajo, el metano puede ascender hasta la estratósfera donde es rápidamente destruido por los rayos ultravioleta, que a través de diversas reacciones químicas producen una serie de otros compuestos orgánicos.

6.8.2.3. Búsqueda de vida en Europa

Tal como vimos en el capítulo anterior, Europa es el menor de los satélites galileanos de Júpiter. Posee una atmósfera muy tenue (10^{-11} bares de presión en la superficie) compuesta de oxígeno de origen no biológico. La temperatura de la superficie de Europa es de -163

°C en el ecuador y de solo −223 °C en los polos, y está cubierta de hielo. Se cree que bajo la superficie helada hay un océano líquido que se mantendría caliente por el calor generado por las fuerzas de mareas de Júpiter y los otros satélites galileanos.

En los océanos, bajo la capa de hielo, podrían existir grietas hidrotermales que eventualmente podrían sostener vida sin la necesidad de la energía solar. Esta idea no es tan exótica como parece en primera instancia, pues en la antártica se han descubierto cientos de lagos bajo la superficie de la placa de hielo. El mayor lago subglacial es el *lago Vostok* un lago totalmente aislado del exterior y protegido de la atmósfera a 3.748 [m] bajo la placa de hielo. Aunque la temperatura media del agua es cercana a los -3 °C permanece líquida (no se tiene muy claro aún el mecanismo).

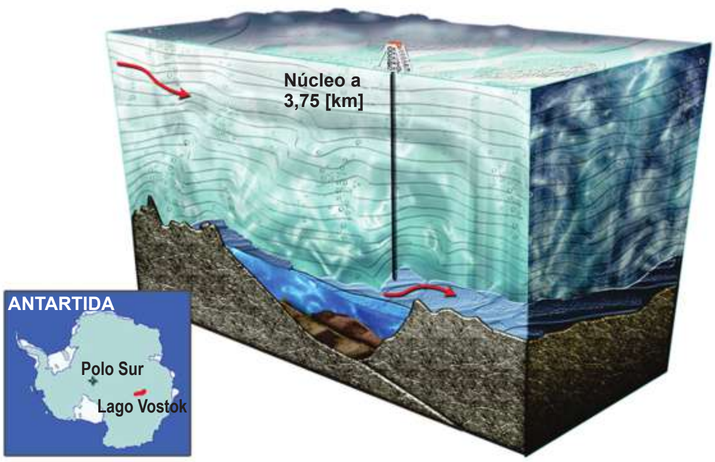


Figura 6.25: El lago Vostok se encuentra en el continente antártico bajo la estación rusa Vostok. La superficie del lago Vostok está estimada en 14.000 kilómetros cuadrados, con una longitud de 250 [km], una anchura de hasta 50 [km] y una profundidad que puede llegar a 500 [m]. Ilustración cortesía Nicolle Rager Fuller, NSF.

En 1998 investigadores de la base Vostok perforaron el hielo alcanzando la profundidad de 3.623 [m], solo 125 [m] sobre la superficie del lago. En la parte más profunda del núcleo de hielo[20], la que se cree formada por el hielo procedente de la congelación del agua del lago, se han encontrado evidencias de vida a nivel microscópico (extremófilos) que sugieren que el agua del lago puede albergar vida, sin embargo, en febrero de 2012, los científicos rusos han perforado hasta la superficie del lago. Los datos preliminares han indicado que la superficie sería estéril, no pudiéndose descartar que sí exista en el fondo del lago. La expedición se reanudaría en diciembre, una vez terminado el invierno antártico. Las muestras de agua obtenidas, que se habrían congelado durante la extracción, serían llevadas a Rusia para su análisis en mayo, solo ahí se podrá confirmar la existencia de vida en dichas muestras. Sea cual sea el resultado, que haya o no vida en el lago Vostok, será una gran noticia, por ejemplo, si no la hubiera, ya no se podría seguir afirmando que en la Tierra donde hay agua líquida hay vida.

La NASA, también planea corroborar la existencia de vida en el lago Vostok. Utilizaría una sonda, llamada *cryobot*, para derretir el hielo, dejando tras de si un cable de comunicaciones y de energía eléctrica. El *cryobot* llevará consigo un mini-submarino llamado *hydrobot*, que será desplegado una vez que el *cryobot* haya derretido el hielo y alcanzado las aguas del lago. La misión del *hydrobot* es la búsqueda de existencia de vida en las aguas de lago, utilizando una cámara de vídeo y otros instrumentos de medición. De la misma forma, la NASA ya tiene pensado enviar una misión similar a Europa que obtendrá información acerca de los océanos y la posibilidad de vida.

[20]Un núcleo de hielo es una muestra cilíndrica de hielo que se obtiene mediante la perforación del sustrato a diferentes profundidades.

6.8.2.4. Búsqueda de vida en Encelado

Como hemos visto en el capítulo anterior, la sonda Cassini ha descubierto que Encelado posee actividad “geológica”. Su superficie helada está llena de fracturas revelando actividad tectónica y criovulcanismo.

La tenue atmósfera está compuesta por vapor de agua, nitrógeno, dióxido de carbono y metano y trazas de cianuro de hidrógeno, acetileno, etano, propano, benceno, formaldehído, y otros compuestos orgánicos. Bajo la superficie, estaría envuelto por un manto de agua helada de varias decenas de kilómetros de espesor que sería mantenido por las fuerzas de marea y la resonancia orbital con Dione.

Teniendo entonces una fuente de energía térmica, agua líquida y compuestos orgánicos, existe la posibilidad que en este océano subglacial exista vida o al menos sus precursores, y a diferencia de Europa, los géiseres en el polo sur del satélite aseguran la existencia de agua líquida y una fuente de energía que la mantenga en dicho estado, por lo que muchos científicos creen que Encelado es un candidato con mejores expectativas a poseer vida que Europa, y no solo eso, no sería necesario tener que taladrar para acceder al océano, ya que los mismos géiseres dan un acceso directo a dicho océano.

Algunos sugieren que el metano observado en los gases sobre la superficie de Encelado serían de origen biogénico producido por organismos metanogénicos. Si éste metano fuera realmente de origen biológico nos pondría en dos posibles escenarios, el primero es que la vida se habría originado en formas similares en dos mundos del sistema solar o que ha ocurrido la panspermia entre ellos, por lo que descubrir el origen de dicho metano podría ser fundamental para nuestro entendimiento del origen de la vida.

6.8.3. Búsqueda de inteligencia extraterrestre

En 1950 *Enrico Fermi* (1901 - 1954) planteó la siguiente interrogante: *si los extraterrestres son tan corrientes, ¿donde están?*, hoy este cuestionamiento es conocido como la *paradoja de Fermi*.

6.8.3.1. La ecuación de Drake

En 1959, dos físicos de la Universidad de Cornell, *Giuseppe Cocconi* (1914 - 2008) y *Philip Morrison* (1915 - 2005) publicaron un artículo en la revista *Nature* donde proponen la posibilidad de usar la radioastronomía como medio para contactar con civilizaciones extraterrestres. En 1961 se llevó a cabo una reunión en *Green Bank*, Virginia Oriental, con la finalidad de discutir sobre este tema. Unos días antes el astrónomo *Frank Drake* (1930 -) construyó un algoritmo para organizar las charlas, donde consideraba todos los temas relevantes para la búsqueda de inteligencia extraterrestre. En 1963 *J. Peter Pearman* publica por primera vez la ecuación de Drake que se utiliza para estimar el número de civilizaciones (N) con capacidad de comunicarse en nuestra galaxia. Esta ecuación es:

$$N = N^{*} \cdot f_p \cdot n_e \cdot f_\ell \cdot f_i \cdot f_c \cdot f_L$$

donde:

N^{*}*: es el número de estrellas en nuestra galaxia.*

f_p*: es la fracción de aquellas estrellas que tienen planetas alrededor de ellas.* Se estima que al menos el 40 % de las estrellas poseen planetas, así este valor es al menos 0,4.

n_e*: es el número de planetas en cada sistema planetario en el cual es posible la formación de vida.* Esto requiere planetas o satélites de tipo rocoso y que encuentren dentro de la zona habitable, adicionalmente que sus órbitas tengan excentricidades tales que no lo saquen de esta zona. Se desconoce todavía este valor, usualmente se usa 2, que es el valor estimado por Drake.

f_ℓ*: es la fracción de los planetas que podrían desarrollar vida en los cuales efectivamente se habría desarrollado la vida.* Otro valor desconocido, supongamos arbitrariamente que este valor es mayor a 0,13 (13 %).

f_i*: es la fracción de tales formas de vida que desarrollan inteligencia.* En el caso de la Tierra no sabemos con certeza este valor, se cree que es menor a 0,01.

f_c*: es la fracción de aquellas formas de vida inteligente que ha elegido intentar comunicarse con otras civilizaciones.* No hay forma de conocer este valor antes de conocer civilizaciones extraterrestres, pues no se pueden hacer cálculos estadísticos. Usualmente se usa el valor estimado por Drake, 0,01.

f_L*: es la fracción del tiempo de vida de una estrella en la cual una forma de vida con alta tecnología puede existir.*

En primera aproximación, el producto:

$$N^* \cdot f_L \approx R^* \cdot L$$

donde:

R^**: es la tasa de formación estelar en nuestra galaxia.* Las observaciones permiten estimar que en nuestra galaxia este valor cercano a 7 $\left[\frac{\text{estrellas}}{\text{año}}\right]$.

L *: es el tiempo en el cual la forma de vida con capacidad de comunicarse puede existir.* No es posible conocer este valor antes de conocer civilizaciones extraterrestres, pues no se pueden hacer cálculos estadísticos. Sin embargo, podemos usar el tiempo que nuestra civilización tecnológica ha sobrevivido, esto es, al menos 70 [años].

Reescribiendo la ecuación de Drake obtenemos:

$$N = R^* \cdot f_p \cdot n_e \cdot f_\ell \cdot f_i \cdot f_c \cdot L$$

El problema pasa por estimar el número de civilizaciones que existen y/o han existido en nuestra galaxia, esto requiere el conocimiento de qué tan frecuentes son las catástrofes (naturales o autoprovocadas), que podrían producir extinciones masivas de estas civilizaciones o que no permitan que se lleguen a constituir. La historia de nuestro planeta muestra que éstas no son poco frecuentes, pero en cualquier caso la vida se las ha arreglado para no extinguirse por completo. Aunque nuestra existencia es resultado de una serie de hechos fortuitos, si nuestros ancestros no hubiesen sobrevivido a la extinción de los dinosaurios, nada nos asegura que en nuestro planeta hubiesen llegado a aparecer *seres inteligentes con capacidad de desarrollar tecnología*; ya que es posible la existencia de vida inteligente sin la capacidad de desarrollar tecnología. Un ejemplo de ello son los *delfines*. Así sería posible que muchos mundos estén dotados de vida y hasta con seres inteligentes que no desarrollan tecnología y debido a ello, nunca saber de su existencia. Basta recordar el largo período de tiempo que le llevó a la vida desarrollar la inteligencia.

Usando valores indicados con anterioridad: $R^* \approx 7$; $f_p \simeq 0{,}4$; $n_e = 2$; $f_\ell > 0{,}13$; $f_i = 0{,}01$; $f_c = 0{,}01$ y $L \geq 70$, obtenemos:

$$N \gtrsim 0{,}005$$

Aunque obtenemos un número muy pequeño, cambiando los valores de los coeficientes más inciertos se puede obtener números mucho menores como también mucho mayores, hasta varios miles.

¿Qué importancia puede tener una ecuación cuyos coeficientes son aún indeterminados y que pueden tomar valores tan diferentes?

La importancia no va en el amplio espectro de valores que se pueden obtener, sino que este es distinto de cero, lo cual hace que cualquier búsqueda (siempre y cuando podamos financiarla) valga la pena.

6.8.3.2. El proyecto SETI

Basados en la idea de la comunicación extraterrestre, importantes científicos como *Frank Drake*, *Carl Sagan* (1934 - 1996), *Paul Horowitz* (1942 -), entre otros impulsan un proyecto que fue inicialmente denominado SETI acrónimo del inglés Búsqueda de Inteligencia Extraterrestre (Search for Extra-Terrestrial Intelligence).

Podemos clasificar los proyectos de comunicación extraterrestre por medio del uso de radiotelescopios, en dos tipos principales:

- Uno *activo*, que consiste en el envío de señales que puedan captar civilizaciones extraterrestres con un cierto grado de desarrollo.
- Uno *pasivo*, que consiste en la búsqueda sistemática de cualquier posible señal extraterrestre.

Solo una vez, en 1974, se ha enviado intencionalmente una señal que informa de nuestra presencia. Dado que no estamos completamente convencidos que sea buena idea alertar a nuestros posibles vecinos de nuestra existencia, la señal, conocida como el *mensaje de Arecibo*, lleva información sobre nuestro sistema solar y los seres humanos (figura 6.26), y fue enviado hacia fuera de la Vía Láctea, en dirección del cúmulo *M13* o *Gran Cúmulo de Hércules*, que se encuentra a 25.100 años luz de distancia, así quien hipotéticamente intercepte el mensaje, le tardará muchísimo tiempo en llegar a visitarnos, puede que por ello, la búsqueda pasiva ha resultado ser la más usada en décadas pasadas.

Por ello, un grupo de científicos se ha dedicado a explorar el cielo en busca de cualquier posible señal extraterrestre. Ello requiere que al menos se den tres importantísimas condiciones:

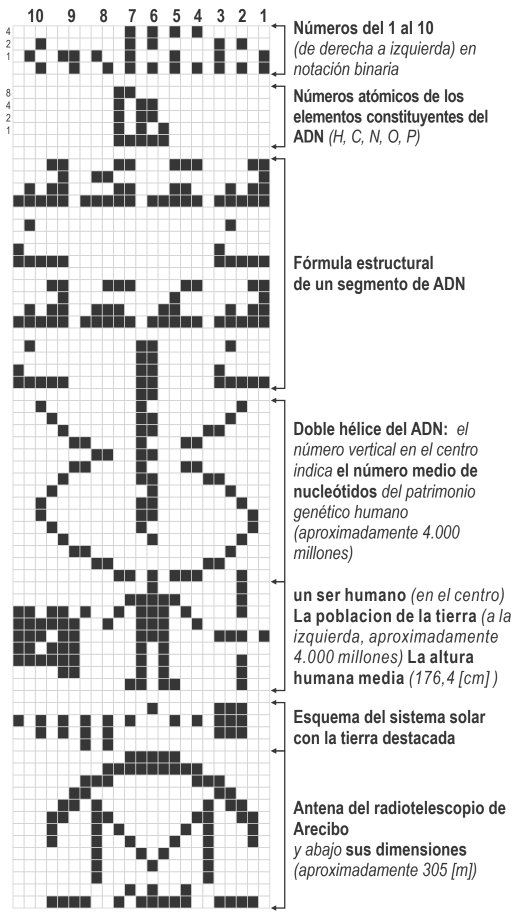


Figura 6.26: El mensaje de Arecibo tenía una longitud de 1679 bits valor que fue elegido debido a que es el producto de dos números primos y por lo tanto sólo se puede descomponer en 23 filas y 73 columnas o 23 columnas y 73 filas, de forma que quien lo lea decida organizar los datos en forma de cuadrilátero. La información organizada de la primera manera no genera ningún tipo de información coherente, pero de la segunda manera contiene información sobre la Tierra y la especie humana que se detalla a la derecha.

- Que aquellas hipotéticas civilizaciones estén transmitiendo, pues si al igual que nosotros solo están a la escucha será evidente que nunca sabremos unos de otros.
- Que estemos escuchando en las frecuencias adecuadas.
- Que si estos seres deciden enviar la señal y en la frecuencia que suponemos, que al menos estemos apuntando algún radiotelescopio en la dirección adecuada para recibir la transmisión.

Este último problema se soluciona parcialmente explorando el cielo y no dejando el radiotelescopio fijo hacia algún punto de la bóveda celeste. El problema de esto es que si captamos alguna señal, no podremos descifrarla, excepto que la señal sea lo suficientemente duradera para descubrirla y apuntar el radiotelescopio al lugar de proveniencia de la señal por el tiempo adecuado para poder obtener información de ella.

La búsqueda de señales se realiza en la frecuencia de 1,42 [GHz] o equivalentemente 21 [cm] de longitud de onda, que corresponde a la frecuencia que emite un electrón cuando se produce una inversión en la dirección de su espín en un átomo de hidrógeno (ver Apéndice C). Se ha supuesto que los extraterrestres escogerían esta frecuencia debido a la abundancia de este elemento en el Universo.

Si ellos no eligen esta frecuencia, podríamos identificar una señal de origen "inteligente" si esta difiere de aquellas generadas naturalmente. Una característica muy poco frecuente en la naturaleza es la *monocromaticidad*[21], así este tipo de señales pueden ser asociadas a un origen artificial, aunque hay que tener precaución con esto, pues en julio de 1967 *Jocelyn Bell* y *Antony Hewish* detectaron pulsos de radio con intervalo exacto de 1,33730113 segundos. Su primera interpretación fue que podrían haber establecido contacto con una civilización extraterrestre, dada la precisa regularidad de la emisión. Llamaron tentativamente a su fuente LGM, acrónimo del inglés *Little Green Men*, pequeños hombres verdes. El posterior descubrimiento de tres nuevos objetos emitiendo en diferentes frecuencias, permitieron evidenciar que estos objetos debían ser producto de fenómenos naturales. Estos resultaron ser los púlsares.

Si existieran estas civilizaciones extraterrestres, la ausencia de estas señales se puede deber a que estamos fuera de su alcance o que sus señales son muy débiles o simplemente que estas civilizaciones no estén emitiendo en esta frecuencia, o al igual que nosotros, no están enviando éstas señales.

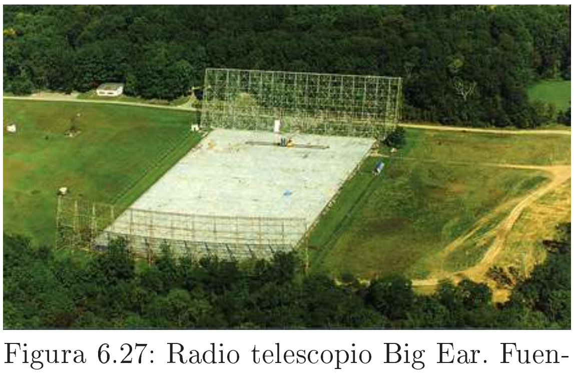


Figura 6.27: Radio telescopio Big Ear. Fuente: http://www.bigear.org/

La pregunta entonces es: en todas estas décadas ¿se ha tenido éxito?, la respuesta es no, aunque no absolutamente no, pues el 15 de agosto de 1977 el radio telescopio *Big Ear* (figura 6.27) de la universidad de Ohio captó una señal durante un minuto aproximadamente que superaba en unas 30 veces al ruido de fondo. Días más tarde, *Jerry Ehman*, profesor de la universidad de Ohio, revisando como de costumbre lo que se había registrado días antes, descubrió atónito la intensa señal. *Wow!* fue lo que marcó en el papel cuando la descubrió (figura 6.28). La señal es conocida desde entonces como la *señal Wow!*

[21]Una señal monócroma, es aquella compuesta por una única frecuencia.

Dado que el radiotelescopio está fijo sobre el suelo (figura 6.27), no puede apuntar un lugar fijo de la esfera celeste, su exploración barre el cielo aprovechando la rotación terrestre. Debido a esto, se espera que si un radiotelescopio barre una zona del cielo desde donde provenga una señal, la intensidad de esta tendrá una forma de campana o *gaussiana*, esto es, aumentando hasta alcanzar un máximo (cuando apunta a la fuente), para luego disminuir.

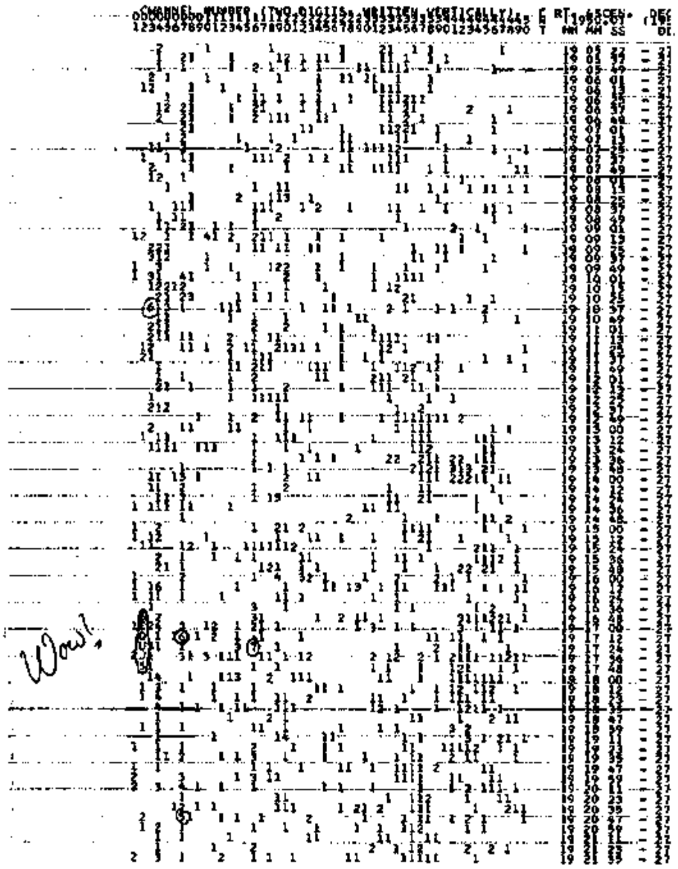


Figura 6.28: La señal Wow!. Créditos: Ohio State University Radio Observatory & North American AstroPhysical Observatory (NAAPO).

El registro que contiene a la señal *Wow!* es de tipo matricial y se realizaba con un código alfanumérico. Cada columna representa un canal y las filas representan el tiempo. Cada fila equivale a unos 10 segundos. Los números que se ven por toda la hoja representan la intensidad de las señales del 0 al 9. Los espacios en blanco simbolizan el 0. Para extender el rango se añadieron letras, así la menor señal sería un espacio blanco y la mayor una Z. Como se ve en la imagen 6.28, la señal *Wow!* fue "*6EQUJ5*". Cada número se basaba en el anterior. Eso indica que cuando se registró la U la señal era 30 veces superior al ruido de fondo, lo que es una señal muy potente.

Por lo que se comprobó después del descubrimiento de la señal, no parecía ser de origen terrestre, aunque, desde entonces no se ha encontrado una explicación de su origen. Sin embargo, para corroborar el origen inteligente de la señal, se requeriría una segunda señal que no se ha vuelto a recibir. De esta forma, para la ciencia la señal *Wow!* no es prueba de la existencia de ninguna inteligencia extraterrestre.

La historia del proyecto SETI ha sido tortuosa. Los primeros proyectos SETI surgieron bajo el patrocinio de la NASA durante los años 1970. A inicios de los 90, la NASA decide involucrarse de lleno con SETI. Para entonces, iniciaron el *SETI Microwave Observing Proyect*, que con un presupuesto de 12 millones de dólares al año utilizaría las antenas del *Deep Space Network* y del radiotelescopio de Arecibo para buscar señales de radio. Lamentablemente, a solo un año de iniciado, los congresistas decidieron reducir el presupuesto a la mitad, y posteriormente cancelar el proyecto al considerar que era un despilfarro de dinero. Aunque el proyecto SETI de la NASA fue cancelado, los técnicos y personal involucrado consiguieron recursos externos para mantenerlo en funcionamiento. Tras la cancelación de los ingresos gubernamentales, varias compañías y particulares aportaron dinero y recursos al proyecto: Steve Jobs (fundador de Apple), Hewlett-Packard, Paramount Pictures y Steven Spielberg entre otros.

En la actualidad cualquier persona puede colaborar con el proyecto SETI a través del popular proyecto *SETI@Home* (SETI at home, lo que significa SETI en casa) de la

Universidad de Berkeley. La idea es el procesamiento, en los computadores personales de usuarios voluntarios, de paquetes de información obtenidos por el radiotelescopio de Arecibo, que pueden ser descargados con un software a través de Internet.

6.8.3.3. Misiones no tripuladas

Existe otra opción que se puede aprovechar para comunicar nuestra existencia a posibles seres extraterrestres. Ésta consiste en enviar información a través de naves construidas con propósitos de exploración, que luego de cumplir esta misión continuarán viajando por el espacio interestelar.

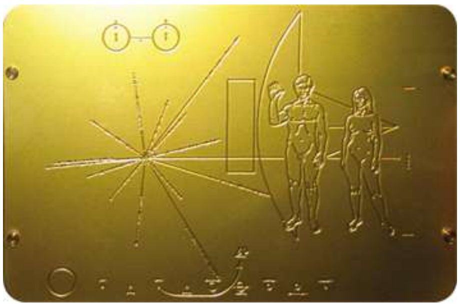


Figura 6.29: Placa de la Pioneer.

Un ejemplo de esto son las sondas *Pioneer 10 y 11*, que tenían como misión principal explorar Júpiter y Saturno. Carl Sagan convenció a la NASA para que las Pioneer llevaran placas inscritas con un mensaje simbólico informando, a una posible civilización extraterrestre que pudiese interceptar las sondas, sobre el ser humano y su lugar de procedencia, la Tierra. Las placas fueron diseñadas por Carl Sagan y Frank Drake, y dibujadas por Linda Salzman Sagan. A la derecha de la placa aparecen representadas dos figuras humanas, una masculina y otra femenina. Se ha dibujado la antena de la sonda con el fin de dar una escala a las figuras humanas. A la izquierda, un haz de líneas que parten radialmente de un mismo punto. Ese punto es el planeta Tierra, las líneas indican la dirección de los púlsares cercanos a nuestro sistema solar más significativos y en cada uno, en sistema de numeración binario, la secuencia de pulsos de cada uno. Una civilización técnicamente avanzada, con conocimiento de los púlsares, podría interpretar las placas y obtener nuestra ubicación. En la parte inferior se representa un esquema del sistema solar, con los planetas ordenados según su distancia al Sol y con la indicación de la ruta inicial de las Pioneer. El esquema situado en la parte superior izquierda de la placa, representa una inversión en la dirección del espín del electrón en un átomo de hidrógeno. Esta transición es la que provoca una onda de radio de 21 [cm].



Figura 6.30: Disco de Oro de la Voyager (izquierda) y la cubierta del mismo (derecha). Créditos: NASA/JPL.

Otro ejemplo fueron las sondas *Voyager 1 y 2*, que portan discos de oro que contienen sonidos e imágenes que retratan la diversidad de la vida y la cultura en la Tierra. Se diseñó con el objetivo de dar a conocer la existencia de vida en la Tierra a alguna posible forma de vida extraterrestre inteligente que lo encontrase, y que además tuviera la capacidad de poder leer, entender y descifrar el disco. El contenido de la grabación fue seleccionado por la NASA y por un comité presidido por Carl Sagan.

6.8.4. Búsqueda de vida en exoplanetas

6.8.4.1. Biomarcadores en la atmósfera terrestre

Hemos visto que los organismos vivientes han jugado un rol fundamental en la evolución de la atmósfera terrestre. Entonces, si la vida no se hubiera desarrollado en la Tierra, el planeta tendría una atmósfera muy distinta de la actual, por lo que estudiando la composición química de la atmósfera terrestre podemos ver si somos capaces de evidenciar la existencia de vida, y luego aplicar este conocimiento para buscar vida en otros planetas.

En la actualidad, además del hombre, los microorganismos son los principales alteradores de la atmósfera. El bacterioplancton, con unos 10^{29} microorganismos, posee una biomasa equivalente a la de las algas y es mayor que la biomasa de los peces y mamíferos marinos. Estas bacterias fijan de la atmósfera hierro, fosfatos y nitrógeno, esto último es particularmente importante pues son los principales organismos capaces de formar los grupos amino (NH_3) fundamentales para los aminoácidos que forman las proteínas, además, sin esta fijación de nitrógeno la fotosíntesis no sería posible. Por otra parte, en zonas oceánicas donde las concentraciones de oxígeno son bajas, se consume NO_3^- en la respiración liberando como residuo nitrógeno molecular que es devuelto a la atmósfera. Además del CO_2, las bacterias oceánicas liberan otros gases de invernadero, tales como el metano y el óxido nitroso (N_2O).

Otro gas que es intercambiado entre los océanos y la atmósfera es el *sulfuro de dimetilo* ($C_2H_5S/(CH_3)_2S$) (responsable del olor caraterístico del mar). De los 100 millones de toneladas liberados a la atmósfera, cerca de un tercio se debe a procesos biológicos en los océanos, aunque la mayor parte se debe a procesos antropogénicos y en menor medida por procesos volcánicos. El sulfuro de dimetilo en la atmósfera reacciona gracias a la radiación ultravioleta formando aerosoles que condensan la humedad, facilitando la formación de nubes, y provocando por ende una disminución de la temperatura en promedio en unos 3 o 4 grados, contrarrestando el efecto invernadero.

Por otra parte, principalmente debido a los seres humanos, otros microorganismos, los metanogénicos, son responsables de la presencia de metano en la atmósfera.

El metano atmosférico es tan o más relevante en el efecto invernadero que el CO_2, incluso sus variaciones pudieron ser responsables de las eras glaciales (ver figura 6.31).

Debido a la fotodisociación (producida por fotones de $\lambda = 121{,}6$ [nm]) y su reacción con el radical OH, el metano tiene un tiempo de residencia de 12 años[22]. La agricultura y la ganadería desarrollada en los últimos milenios han mantenido cantidades apreciables de este gas en

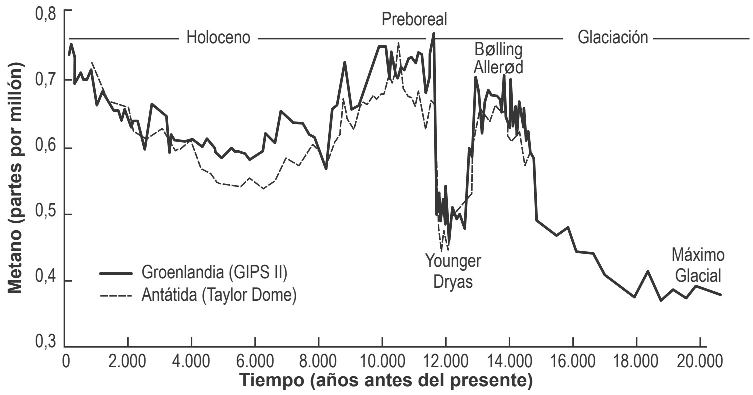


Figura 6.31: Variación de la concentración de metano atmosférico en los últimos 20.000 años, hasta el fin de la época preindustrial, estimada a partir de gases encerrados en los hielos de Groenlandia y de la Antártida. Adaptado de Brook et al. 2000.

[22]Este período de vida ha sido definido como un tiempo de ajuste que tiene en cuenta el efecto indirecto del gas en su propio tiempo de residencia.

nuestra atmósfera, pudiendo quizás ser utilizado como un trazador de vida e incluso de vida inteligente.

La agricultura y la ganadería permitieron al ser humano hacerse sedentario, esto ha conllevado la progresiva modificación de su entorno. Algunos creen que el aumento de la concentración de metano que comenzó hace unos 5.000 años (ver figura 6.31), puede atribuirse por una parte a las bacterias metanogénicas que se desarrollan en los barros de las tierras inundadas de los campos de cultivos de arroz, y por otra parte, en los estómagos de los animales rumiantes se produce metano por fermentación entérica, aunque también por el estiércol. La reacción puede ser resumida como:

$$CO_2 + 4H_2 \longrightarrow CH_4 + 2H_2O$$

Entre el 5 y el 10 % de la masa del alimento de una vaca se transforma en metano.

En la actualidad las principales fuentes de metano son (ver figura 6.32):

- Cultivo del arroz
- Combustión de biomasa (quema de pastos y bosques)
- Producción de metano por el ganado, principalmente procesos digestivos de la vacas.

Analicemos con mayor detalle los orígenes del metano atmosférico. Cerca del 60 % del metano producido puede ser atribuído a fuentes antopogénicas, de las cuales un 40 % corresponden a la agricultura. Los procesos biológicos anaerobios son los principales productores de metano, también una parte importante se debe a fugas o pérdidas de gas natural en industrias y durante la extracción y transporte.

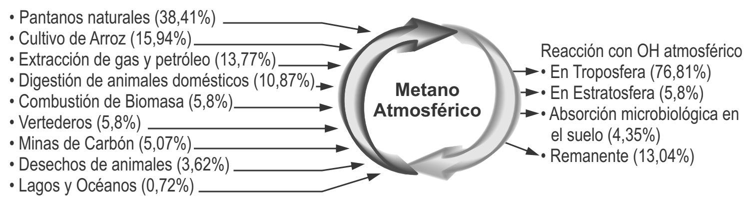


Figura 6.32: Fuentes de emisión y aniquilación de metano atmosférico. Adaptado de Moss et al. Ann. Zootech. v49, p231-253, (2000).

En la troposfera, la mayor fuente de aniquilación del metano es la reacción con el hidróxido (OH) a través de la reacción:

$$CH_4 + OH^- \longrightarrow CH_3^- + H_2O$$

La principal fuente de OH es la fotodisociación de ozono troposférico y la posterior reacción con el vapor de agua.

$$O_3 + h\nu \longrightarrow O\left(^1D\right) + O_2$$
$$O_3 + h\nu \longrightarrow O + O_2$$

donde $O(^1D)$ es el primer estado excitado del oxígeno atómico, que a su vez reacciona con el vapor de agua para formar 2 radicales OH:

$$O\left(^1D\right) + H_2O \longrightarrow OH + OH$$

Aunque el OH también puede ser formado por la oxidación de CH_4 en la estratosfera debido a las altas concentraciones de Cl.

Observamos que, en principio, el aumento del metano atmosférico reduce la cantidad de OH, pues reacciona con él, aunque puede ser compensados por el aumento de la producción a través de O_3 y NO_x. Sin embargo, el ozono estratosférico ha disminuído en los últimos años, por lo cual la radiación ultravioleta en la troposfera aumenta incrementando por ende el OH y además el vapor de agua. El aumento de temperatura puede contribuir al aumento o disminución del OH.

Entonces nuestra atmósfera posee gases que en principio si no fuera por la actividad biogénica no se encontrarían o solo serían trazas, entre estos tenemos el oxígeno (en forma molecular como O_2 u O_3) proveniente de organismos fotosintéticos y el metano proveniente de organismos metanogénicos. Tendremos entonces que estudiar el espectro de la Tierra (atmósfera y superficie) para ver si somos capaces de identificar la existencia de vida y estudiar qué gases efectivamente pueden ser trazadores de vida o *biomarcadores*.

Desde el espacio se ha analizado el espectro de nuestra atmósfera con la sonda Galileo la cual tuvo que pasar a principios de los noventa por las cercanías de la Tierra para ganar el impulso necesario para alcanzar la órbita de Júpiter. Los análisis espectrométricos de la sonda Galileo mostraron la presencia de oxígeno, metano y agua en varias formas tales como hielo y granos de nieve en la Antártica. Se observó disminución del albedo en las zonas tropicales e incrementos en la temperatura superficial que permiten la existencia de agua en estado líquido. Incluso fueron identificadas zonas lisas y extensas en la superficie lo que podría corresponder a océanos de agua líquida. Esto fue deducido gracias a la gran cantidad de agua atmósferica encontrada en la zona del Pacífico Este, donde las concentraciones eran de 1.000 [ppm] a presiones cercanas a los 0,6 [gr/cm^3]. Las temperaturas que permiten la existencia de agua líquida pueden explicarse a través de la presencia de gases de invernadero (ver figura 6.33).

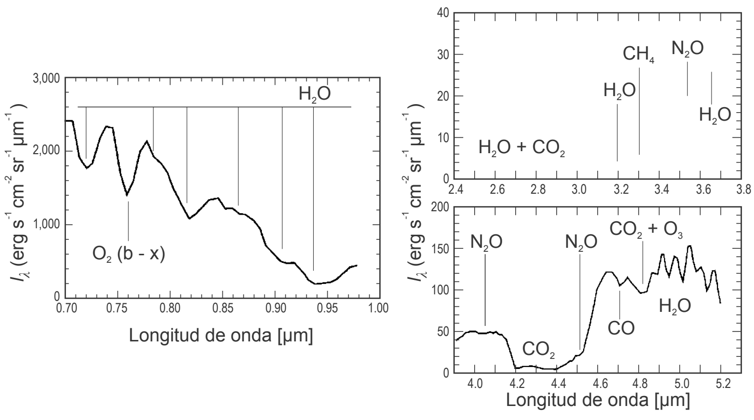


Figura 6.33: Espectros obtenidos por la Galileo: a la izquierda un espectro obtenido de una región del Pacífico, se observa una transición de la molécula O-O a 0,76 [μm] y varias líneas de H_2O. A la derecha se observan líneas de absorción de distintas moléculas entre ellas CO_2, H_2O, N_2O y CH_4. Reproducido con el permiso de Macmillan Publishers Ltd: Nature 365, p. 715 © 1993.

La existencia de una transición prohibida del oxígeno (ver figura 6.33) permite concluir que el gas tiene una presión cercana a los 200 [gr/cm^3], teniendo una abundancia única en comparación con los otros planetas del sistema solar. La producción de oxígeno en una atmósfera con vapor de agua se realiza por fotodisociación, principalmente en la banda de 150 a 210 [nm]:

$$\begin{aligned} H_2O + h\nu &\longrightarrow OH + H \\ H + OH - h\nu &\longrightarrow 2H + O \\ 2H + O &\longrightarrow H_2 + O \end{aligned}$$

El OH es muy reactivo y se combina con el oxígeno atómico:

$$O + OH \longrightarrow O_2 + H$$

La Galileo determinó que el 19 % de la atmósfera corresponde a oxígeno. Un valor in-

teresante, pues si fuera inferior al 15 % no se produciría fuego por combustión y si fuera superior al 25 % la combustión sería espontánea incluso de materia orgánica húmeda. Si comparamos este valor con el de Venus y Marte (Tabla 6.3) observamos que la Tierra posee valores mucho mayores de N_2 y O_2, pero un valor muy bajo de CO_2. En principio no es fácil dar una explicación del alto valor del O_2, esto requeriría conocer el estado de oxidación de la superficie, tasas de erosión superficial y temperatura de la tropopausa y la exobase[23]. Una estimación se puede obtener conociendo la tasa de fotólisis del agua, esto en principio se podría obtener de la concentración de vapor de agua en la atmósfera y la cantidad de fotones incidentes en el rango de longitudes de onda correspondientes.

	Venus	Tierra	Marte
Presión superficial			
	100	1	0,006
Composición			
CO_2	> 98 %	0,03 %	96 %
N_2	1 %	78 %	2,5 %
Ar	1 %	1 %	1,5 %
O_2	0,0 %	21 %	2,5 %
H_2O	0,0 %	0,1 %	0-0,1 %

Tabla 6.3: Tabla comparativa de presión y composición química de las atmósferas de los tres planetas rocosos con atmósferas.

La Galileo buscó trazas de O_3 en la atmósfera de Venus y la Tierra, y tal como era de esperar, debido a las concentraciones de oxígeno en las atmósferas, solo encontró en la atmósfera de la Tierra.

Una forma de estudiar el espectro de reflexión de la Tierra es a través de la luz cenicienta de la Luna. Ésta consiste en la tenue iluminación de la parte oscura de la Luna, debida al reflejo de la luz solar por la parte de la Tierra que está iluminada por el Sol. Esto ocurre cuando una delgada franja lunar se encuentra iluminada unos pocos días antes y/o después de la luna nueva. Gracias a ello, es posible usar la Luna para obtener la luz proveniente de la Tierra y determinar cuál es su espectro, tal como si fuera vista desde un planeta lejano, aunque con mayor resolución. Estos espectros fueron obtenidos por primera vez en el visible en 2001 y ampliada al infrarrojo cercano en 2006. Los espectros obtenidos en ambos trabajos están integrados en la figura 6.34.

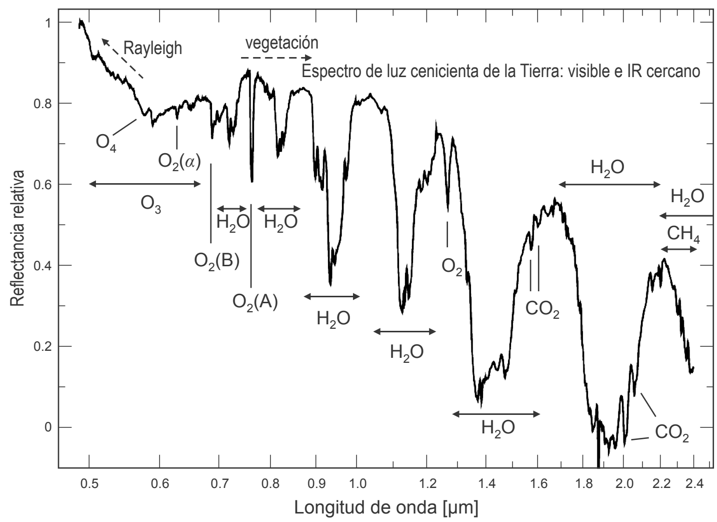


Figura 6.34: Espectros de reflexión de la Tierra del visible y el infrarrojo cercano obtenido de la luz cenicienta de la Luna en junio de 2001 y noviembre de 2003. Fuente: Turnbull et al. ApJ. 644, 551 (2006). Reproducido con el permiso de AAS.

Además de los compuestos químicos se observa la dispersión de Rayleigh[24] y la re-

[23]La exobase es el límite inferior de la exósfera y se ubica justo donde el camino libre medio es igual a la escala de presión de altura (altura en la atmósfera donde la presión es 1/e veces su valor en la superficie). Por encima de este nivel, la mayoría de las moléculas que se mueven hacia arriba no sufren colisiones y escapan.

[24]La dispersión o esparcimiento Rayleigh es la que sufre la radiación electromagnética por moléculas o partículas de tamaños mucho menores que la longitud de onda de los fotones dispersados. El esparcimiento Rayleigh de la componente azul de la luz solar en la atmósfera es la principal razón de que el cielo se vea de color azul.

flectividad de plantas terrestres que tienen clorofila, siendo apreciable para longitudes de onda mayores que 0,72 [μm]. Otro efecto importante es la modelación de diversas zonas de refletividad, por ejemplo océanos y nubes a distintas altitudes.

Por otra parte, para obtener el espectro de transmisión, se puede hacer durante un eclipse lunar, ya que en la fase de totalidad la Luna es iluminada por luz solar que ha sido dispersada por la atmósfera terrestre (figura 6.35), de esta forma dicho espectro tendrá el espectro del Sol junto al de la Tierra. La figura 6.36 muestra el espectro de transmisión de la atmósfera terrestre.

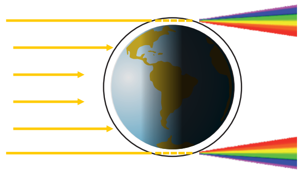


Figura 6.35: La dispersión producida por la atmósfera terrestre sobre la luz que la atraviesa. Es la responsable que durante la fase de totalidad del eclipse total de Luna, ésta se vea enrojecida.

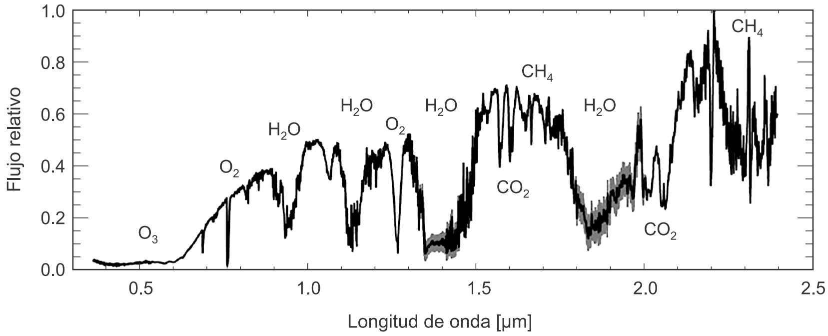


Figura 6.36: Espectro de transmisión de la Tierra donde se han indicado algunos de los principales constituyentes atmosféricos. Reproducido con el permiso de Macmillan Publishers Ltd: Nature 459, 814 © 2009.

6.8.4.2. Búsqueda de biomarcadores en atmósferas de exoplanetas

Para buscar trazas de vida en atmósferas de exoplanetas necesitamos ser capaces de obtener sus espectros, pero una cosa es obtener el espectro de la Tierra y otra muy distinta es obtener el espectro de un planeta extrasolar, más aún si es tipo exotierra.

Para poder obtener el espectro de un exoplaneta, éste debe transitar frente a su estrella desde nuestra línea de visión. Entonces podemos aprovechar cuando el planeta está en tránsito y obtener el espectro de la estrella. El espectro que se obtiene será el espectro de la estrella, pero también algunos fotones serán absorbidos por la atmósfera del planeta, por lo que junto al espectro de la estrella viene también el de la atmósfera planetaria.

El problema fundamental es poder extraer el débil espectro del planeta del intenso espectro de la estrella. Esto se logra obteniendo otro espectro cuando el planeta se encuentra en ocultación, en esta configuración el espectro que se obtiene es solo el de la estrella, y con ésto podemos sustraérlo al espectro obtenido durante el tránsito. Esto parece más fácil de lo que realmente es, ya que hay varios problemas que resolver, por ejemplo, si la estrella tenía manchas, si una de ellas fue ocultada por el planeta en tránsito y que el espectro del planeta tenga una señal mayor al ruido térmico del CCD. En general, dado que la resolución de los instrumentos no es muy alta, se requiere integrar los fotones en un cierto rango de longitudes de onda, no permitiendo observar directamente líneas individuales. Una vez logrado lo anterior se obtienen una serie de puntos que representan el espectro integrado en un rango de longitud de onda dado por el espectrómetro o el filtro usado, y a estos puntos se superponen curvas teóricas de espectros con ciertas líneas o bandas hasta que se encuentra el mejor ajuste.

Aunque las resoluciones de los espectrómetros no es aún la suficiente para observar un planeta tipo exotierra, ya se están obteniendo espectros de planetas gigantes y de supertierras. Por ejemplo, se ha identificado agua y metano en la atmósfera del planeta HD 189733b (ver figura 6.37).

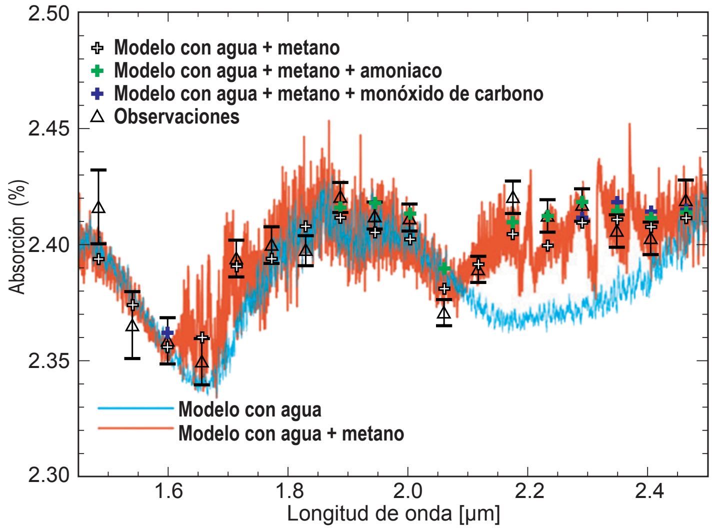


Figura 6.37: Espectro de la atmósfera del planeta HD 189733b (triángulos negros), al cual se han superpuesto dos espectros teóricos con absorción debida a pequeñas cantidades de agua (espectro celeste) y de metano en combinación con agua (color naranja). Las diferencias observadas en el rango de 1,7-1,8 y 2,15–2,4 [μm] se pueden interpretar como consecuencia de la presencia de uno o más compuestos, además de agua. El espectro de mejor ajuste tiene una abundancia de agua del orden de $5 \cdot 10^{-4}$, y de metano del orden de $5 \cdot 10^{-5}$. Adicionalmente se han agregado dos espectros mejorados con la adición de las pequeñas cantidades $\left(\sim 1 \cdot 10^{-5}\right)$ de amoníaco o de monóxido de carbono que se muestran con cruces verdosas y púrpura, respectivamente. Reproducido con el permiso de Macmillan Publishers Ltd: Nature 452, 329 © 2008.

Para obtener el espectro de un planeta rocoso (como uno tipo exotierra o supertierra), primero es necesario comprobar la existencia de la atmósfera, una vez hecho esto se puede obtener el espectro. La detección de la atmósfera se realiza con telescopios en tierra, observando el tránsito del planeta en dos o más regiones distintas del espectro (llamadas bandas fotométricas) de forma de evidenciar diferencias en la profundidad del tránsito, esto quiere decir, diferencias en la disminución del brillo de la estrella entre una banda y la otra. Estas diferencias se producen debido a la dispersión Rayleigh ocurrida al atravesar la atmósfera o debido a absorción por moléculas de la atmósfera.

Una vez confirmada la existencia de la atmósfera se utilizan telescopios espaciales para obtener el espectro, ya que la atmósfera es muy opaca en las longitudes de onda del infrarrojo (ver Volumen I, figura 1.10), que es donde están las líneas y bandas

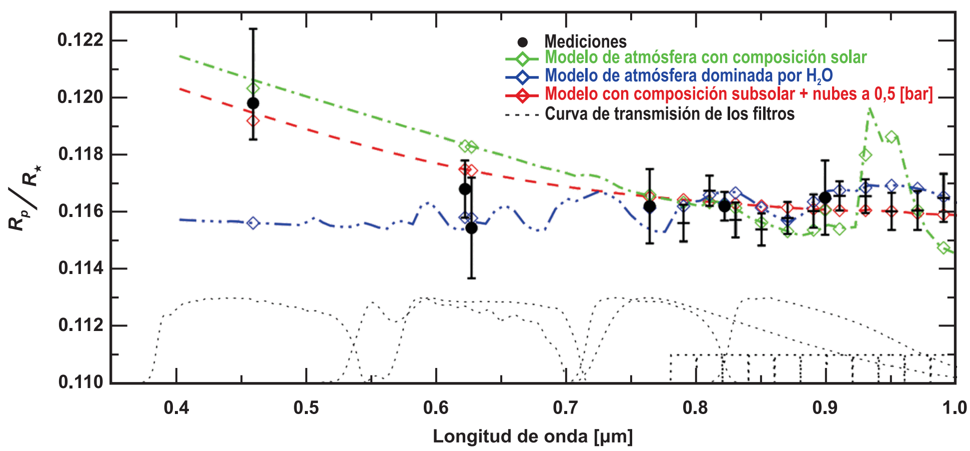


Figura 6.38: Medición de la razón entre el radio de la supertierra GJ1214b y la estrella huesped a diferentes longitudes de onda. Los puntos negros representan las mediciones y las líneas de colores representan modelos con diferentes composiciones químicas para su atmósfera. Créditos: de Mooij et al. A&A, 538, A46 (2012). Reproducido con el permiso de © ESO.

que nos interesan. Pese a ello, desde Tierra se pueden usar varios filtros para observar el tránsito, otorgando un espectro de transmisión de baja resolución. La figura 6.38 muestra este tipo de espectro de la supertierra GJ1214b, obtenido desde tierra.

Una vez que se tengan espectros de mejor resolución en los próximos años, se podrán buscar gases fuera del equilibrio termodinámico en atmósferas de exoplanetas, los denominados biomarcadores, y a través de estos revelar la posible existencia de vida. Y una vez que se disponga de las nuevas generaciones de telescopios espaciales en las próximas décadas (por ejemplo el James Webb o telescopios espaciales interferométricos como *Darwin* o *Terrestrial Planet Finder*) se podrán extender estos estudios a exoplanetas tipo Tierra.

6.9. Bibliografía del capítulo

- *El Origen de la Vida*. Oparin A.I. Moscow 1924 (Existen varias versiones publicadas en español por varias editoriales).
- *El Origen de la Vida*. Folsome C. E.. Editorial Reverté. 1989.
- *Extraterrestrial Intelligence*, Part I The Bioastronomical Prospect (Caps. 1, 2, 3, 4). Heidmann J. Cambrige University Press. 1997.
- *Gramáticas extraterrestres: La comunicación con civilizaciones interestelares a la luz de la ciencia*. Fernando Ballesteros. Publicacions de la Universitat de València. 2008.
- *Astrobiología: Un puente entre el Big Bang y la vida*. Bartolo L. et al. Ediciones AKAL. 2009.
- *Astrobiología: del Big Bang a las Civilizaciones*. Guillermo A. Lemarchand & Gonzalo Tancredi (eds.). UNESCO. 2010.
- *Origen de la Vida Sobre la Tierra*. Leslie E. Orgel. *Investigación y Ciencia*, Págs. 47-53, Diciembre 1994.
- *El Origen de la Vida Desde un Punto de Vista Geológico*, Gómez-Caballero J. A. & Pantoja-Alor J. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, Tomo LVI, Núm. 1, 2003 P. 56-86.http://geoinf.igeolcu.unam.mx/boletinsgm/epoca03/2003-56Gomez.pdf
- *Oxygen-isotope evidence from ancient zircons for liquid water at the Earth's surface 4,300 Myr ago*, Mojzsis S.J., Harrison T.M. & Pidgeon R.T. , *Nature* 6409, 178 - 181. 2001.
- *U-rich Archaean sea-floor sediments from Greenland - indications of* > 3700 *Ma oxygenic photosynthesis*, Rosing M. T. & Frei R. *Earth and Planetary Science Letters* 217 (3-4) 237-244. 2004.
- *Early Archean (3.3-billion to 3.5-billion-year-old) microfossils from Warrawoona Group, Australia*. Schopf JW. & Packer BM. *Science* 237, Issue 4810, p. 70-73. July 1987.
- *Geochemical evidence for terrestrial ecosystems 2.6 billion years ago*, Watanabe Y., Martini J. E. J. & Ohmoto H., *Nature* 408, 574 - 578 (2000).

- *Earth's Early Atmosphere.* Wiechert U. *Science* 298. no. 5602, p. 2341 - 2342. December 2002
- *Prebiotic Soup – Revisiting the Miller Experiment.* Bada J. L. & Lazcano A. *Science* 300, p.745. May 2003.
- *Synthesizing Life.* Szostak, J.W., Bartel, D.P., & Luisi, P.L. *Nature* 409, 387–390. 2001.
- *The First Cell Membranes.* Deamer D. et al. *Astrobiology* Vol. 2, 371-381. 2002.
- *An Efficient Prebiotic Synthesis of Cytosine and Uracil.* Miller, S. L., & Robertson, M. P., *Nature* 375, 772. 1995.
- *Cometary delivery of organics molecules to the early Earth.* Chyba C. et al *Science* 249 no. 4967 pp. 366-373. 1990.
- *The RNA World*, Gilbert W, *Nature* 319, 618. 1986.
- *RNA-Catalyzed RNA Polymerization: Accurate and General RNA-Templated Primer Extension.* Johnston W. K. et al. *Science* 292, 1319-1325. 2001.
- *Survival of the fittest before the beginning of life: selection of the first oligonucleotidelike polymers by UV light*, Mulkidjanian A. Y. et al. *BMC Evolutionary Biology* 2003, 3:12
- *Possible origin of a membrane in the subsurface of the Earth.* Trevors, J.T. *Cell Biol. Int.* 27 451-457 (2003).
- *Formation of the initial cell membranes under primordial Earth conditions.* Mozafari M.R., Reed C.J. & Rostron C. *Cell. Mol. Biol. Lett.* Vol. 9, Supplement 2, 2004.
- *Comets - A Vehicle for Panspermia.* F. Hoyle & C. Wickramasinghe. *Astrophysics and Space Science*, Volume 268, Numbers 1-3, 1999 , pp. 333-341(9)
- *Microorganisms cultured from stratospheric air samples obtained at 41 km.* Wainwright M. et al *Microbiology Letters*, Vol. 218 Issue 1 pp 161-165, (2003). http://meghnad.iucaa.ernet.in/~jvn/FEMS.html
- *New biology of red rain extremophiles prove cometary panspermia* - Godfrey Louis & A. Santhosh Kumar, Dec. 2003. http://arxiv.org/abs/astro-ph/0312639
- *The red rain phenomenon of Kerala and its possible extraterrestrial origin.* Kumar L. G. *Astrophysics and Space Science*, Vol. 302, No. 1-4, pp. 175-187. 2006.
- *Design and the Anthropic Principle*: http://www.reasons.org/articles/design-and-the-anthropic-principle
- *Evolution of a habitable planet.* James F. Kasting & David Catling. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 41(1):429 - 463, 2003.
- *Life and the Evolution of Earth's Atmosphere.* James F. Kasting et all. *Science* 296, p. 1066-1068 (L). 2002.

- *Glacial Cycles and Astronomical Forcing*. Richard A. Muller & Gordon J. MacDonald. *Science* 277. no. 5323, pp. 215 - 218. July 1997.
- *Cydonia - the face on Mars*: http://www.esa.int/SPECIALS/Mars_Express/SEM09F8LURE_1.html
- *Search for Past Life on Mars: Possible Relic Biogenic Activity in Martian Meteorite ALH84001*. McKay D. et al. *Science* 273 no. 5277 pp. 924-930. August 1996.
- Magnetic Chains from Mars: http://science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2001/ast28feb_1/
- *On the origin and timing of rapid changes in atmospheric methane during the last glacial period*. Brook E. et al. *Global Biogeochemical Cycles*, Volume 14, Issue 2, p. 559-572. June 2000.
- *Methane production by ruminants: Its contribution to global warming*. Moss, A. R., Jouany J. P., & Newbold C. J.. *Ann. Zootech.* 49: 231-253. 2000.
- *A search for life on Earth from the Galileo spacecraft*. Sagan C. et al. *Nature* 365, p. 715-721. October 1993.
- *The Spectrum of Earthshine: A Pale Blue Dot Observed from the Ground*. Woolf N. J. & Smith P. S. *ApJ* 574 p. 430-433. July 2002.
- *Spectrum of a Habitable World: Earthshine in the Near-Infrared*. Turnbull M. et al. *ApJ* 644:1, p. 551-559. June 2006.
- *Earth's transmission spectrum from lunar eclipse observations*. Pallé E. et al. *Nature* 459, 814-816. June 2009.
- *The presence of methane in the atmosphere of an extrasolar planet*. Swain M. R., Vasisht G. & Tinetti G. *Nature* 452, p. 329-331. March 2008.
- *A ground-based transmission spectrum of the super-Earth exoplanet GJ 1214b*. Bean J.L., Miller-Ricci E. & Homeier D. *Nature* **468**, 669-672. December 2010.
- *Optical to near-infrared transit observations of super-Earth GJ 1214b: water-world or mini-Neptune?*. de Mooij E. J. W. et al. *A*&A 538, A46. February 2012.

Parte IV

Apéndices

Apéndice A

Glosario

Aceleración: Rapidez de cambio de la velocidad de un cuerpo.

Agujero negro: Región finita del espacio-tiempo encerrada por una superficie, llamada horizonte de eventos o de sucesos, y de cuyo interior no puede escapar ninguna señal, incluyendo la luz. Dicho horizonte separa la zona interna, denominada agujero negro, del resto del Universo, debido a que limita el espacio a partir de la cual ninguna partícula puede salir.

Año-luz (Segundo-luz): Distancia recorrida por la luz en un año (un segundo).

Átomo: Del griego *άτομον* (indivisible), es la unidad más pequeña de un elemento químico que mantiene su identidad o sus propiedades y que no es posible dividir mediante procesos químicos.

Big-Bang: Hipotético evento desde el cual comienza la expansión del Universo desde una singularidad primigenia o primordial.

Big-Crunch: Singularidad al término de la hipotética contracción del Universo.

Campo magnético: Es el responsable de las fuerzas magnéticas, producido por el movimiento relativo de cargas o por variaciones del campo eléctrico de estas. Junto con el campo eléctrico forman el campo electromagnético.

Carga eléctrica: Propiedad de una partícula por la cual puede repeler o atraer a otras partículas que tengan carga del mismo signo u opuesto.

Cero absoluto: Temperatura más baja de la naturaleza, en la cual un cuerpo o sistema de partículas no contendría energía térmica.

Cono de luz: Superficie en el espacio-tiempo que marca las posibles direcciones para los rayos de luz que pasan por un suceso dado.

Conservación de la energía: Ley de la naturaleza que explica que la energía o su equivalente en masa no puede ser creada ni destruida.

Constante cosmológica: Recurso matemático introducido por Einstein para dar al espacio-tiempo una tendencia inherente a no expandirse ni contraerse. En la actualidad la constante cosmológica parece ser más que eso, pues estaría asociada a una energía, llamada oscura, que produce a gran escala una aceleración de la expansión del Universo.

Coordenadas: Números que especifican la posición de un punto en el espacio y el tiempo.

Cosmología: Estudio del Universo como un todo.

Cuanto: Mínimo valor que pueden tomar algunas magnitudes físicas, o también, la mínima variación posible de estas al pasar de un estado discreto a otro.

Desplazamiento o corrimiento hacia el rojo: Incremento en la longitud de onda de la radiación electromagnética recibida comparada con la longitud de onda emitida por la fuente o su equivalente en el laboratorio. En el caso partícular de la astronomía o astrofísica, las líneas espectrales de la radiación de una estrella se desplazan producto del alejamiento de nosotros precisamente hacia el rojo del espectro electromagnético, esto se debe al efecto Doppler. Si la naturaleza del desplazamiento es de tipo "*cosmológica*", se debe a la expansión del espacio-tiempo y no debido al efecto Doppler, pues en este caso no existe movimiento relativo.

Decaimiento radiactivo: Fenómeno natural, por el cual algunas sustancias o elementos químicos llamados radiactivos, emiten radiaciones que tienen la propiedad de impresionar placas fotográficas, ionizar gases, producir fluorescencia, atravesar cuerpos opacos a la luz ordinaria, etc. Debido a esa capacidad se las suele denominar radiaciones ionizantes. Las radiaciones emitidas pueden ser electromagnéticas en forma de rayos X o rayos gamma, o bien partículas, como pueden ser núcleos de helio, electrones o positrones, protones u otras.

Dimensión espacial: Cualquiera de las direcciones independientes en que puede moverse un cuerpo (por ejemplo: arriba-abajo, norte-sur, este-oeste). Cualquier movimiento en el espacio puede expresarse en término de estos tres movimientos.

Dualidad onda-partícula: En mecánica cuántica, concepto de que las partículas pueden a veces comportarse como ondas, y las ondas como partículas. Por lo cual no hay distinción entre ondas y partículas antes de realizar un experimento.

Electrón: Del griego $\varepsilon\lambda\varepsilon\kappa\tau\rho\nu$ (ámbar), es una partícula subatómica con carga eléctrica negativa. En un átomo los electrones rodean el núcleo, que está compuesto únicamente de protones y neutrones.

Espacio-tiempo: El espacio de cuatro dimensiones, tres dimensiones espaciales y una dimensión temporal, cuyos puntos son los llamados eventos o sucesos.

Espectro: Distribución de la intensidad de una radiación en función de una magnitud característica, como la longitud de onda, la energía, la frecuencia o la masa. También recibe este nombre la representación gráfica de cualquiera de estas distribuciones.

Espín (spin): Propiedad intrínseca de las partículas elementales, que puede ser asociada con, pero no idéntica al concepto ordinario de giro.

Fotón: Cuanto de radiación electromagnética, un caso particular es un cuanto de luz.

Frecuencia: Para una onda, número de ciclos por unidad de tiempo.

Fusión nuclear: proceso en el que dos núcleos chocan y se funden para formar un único núcleo, más masivo.

Horizonte de eventos o sucesos: Superficie cerrada que es la frontera de un agujero negro. En el interior del horizonte, la rapidez de escape es mayor a la rapidez de la luz, por lo que, cualquier partícula dentro de él, incluyendo a los fotones, no pueden escapar debido al extremadamente intenso campo gravitacional. Las partículas del exterior que "caen" dentro de esta región nunca vuelven a salir.

Interacción (o fuerza) electromagnética: La segunda más fuerte de las cuatro fuerzas fundamentales, y junto a la gravedad son fuerzas de largo alcance. Afecta a las partículas con carga eléctrica.

Interacción nuclear débil: La segunda más débil de las cuatro fuerzas fundamentales, con un alcance muy corto. Afecta a todas las partículas materiales, pero no a las partículas "portadoras de fuerzas".

Interacción nuclear fuerte: La más fuerte de las cuatro fuerzas fundamentales y la que tiene el menor alcance de todas. Mantiene juntos a los quarks dentro de los protones y los neutrones, y une los protones y los neutrones para formar el núcleo del átomo.

Isótopo: Del griego *ίσος*, mismo y *τόπος*, lugar. Cada uno de los elementos químicos que poseen el mismo número de protones y distinto número de neutrones. Todos los isótopos de un elemento ocupan el mismo lugar en la tabla periódica y poseen las mismas propiedades químicas.

Isótopo radiactivo: Se caracteriza por tener un núcleo atómico inestable, es decir, tienen un tiempo de decaimiento pequeño. Al decaer a una forma más estable emite energía.

Isótopos estables: Átomos que tienen el mismo número atómico, pero diferente número másico. Su estabilidad se debe al hecho de que, aunque son radiactivos, tienen un tiempo de decaimiento extremadamente grande, aún comparado con la edad de la Tierra.

Límite de Chandrasekhar: Límite de masa más allá del cual la degeneración de electrones no es capaz de contrarrestar la fuerza de gravedad en un núcleo estelar, produciéndose un colapso; dando origen a una estrella de neutrones o a un agujero negro. Este límite equivale aproximadamente a 1,44 masas solares, y es la masa máxima posible de una enana blanca.

Longitud de onda: En una onda, es la mínima distancia entre dos elementos consecutivos del medio que se encuentran en el mismo estado de vibración.

Masa: Magnitud física fundamental, definida en la mecánica newtoniana como la cuantificación de la inercia o resistencia a la aceleración. Por otra parte en la teoría de la gravitación universal la masa tiene otro rol; es la propiedad que "genera" y "hace a un cuerpo sentir" la fuerza gravitacional. En la teoría de la relatividad especial, la masa es proporcional a la energía intríseca del cuerpo, conocida como energía del reposo: $E = mc^2$.

Mecánica cuántica: Teoría física que estudia el comportamiento de la materia a nivel microscópico. Fue desarrollada a partir del principio cuántico de Plank y del principio de incertidumbre de Heisenberg.

Neutrón: Partícula muy similar al protón pero sin carga, que se encuentra principalmente en el núcleo de los átomos.

Núcleo atómico: Parte central del átomo, que consta sólo de protones y neutrones, mantenidos juntos por la fuerza nuclear.

Número atómico: Número que indica para cierto elemento la cantidad de protones contenidos en el núcleo del átomo, se representa por la letra Z y se escribe en la parte inferior izquierda del símbolo químico. Es el que distingue a un elemento químico de otro.

Número másico: Número total de nucleones que contiene un átomo, representado por la letra A y se escribe en la parte superior izquierda del símbolo químico. Para átomos con un mismo número atómico, distingue a un isótopo de otro.

Partícula elemental: Partícula que se cree que no puede ser subdividida ni se conoce que tenga estructura interna.

Partícula virtual: En mecánica cuántica, partícula que no puede ser nunca detectada directamente, pero cuya existencia sí tiene efectos medibles.

Peso: La fuerza ejercida sobre un cuerpo por un campo gravitatorio. Es proporcional, pero no igual, a su masa.

Positrón: Denominado también antielectrón, es una partícula cuya única diferencia con el electrón es que el signo de la carga eléctrica es positiva.

Protón: Cada una de las partículas cargadas positivamente en el núcleo del átomo.

Quark: Partícula elemental (cargada) que siente la interacción fuerte. Protones y neutrones están compuestos cada uno por tres quarks.

Radiación de fondo de microondas: Radiación electromagnética descubierta en 1965 que llena el Universo por completo. Procedente del brillo del caliente Universo primigenio, en la actualidad está tan fuertemente desplazada hacia el rojo, que no aparece como luz sino como microondas.

Radiactividad: Fenómeno natural, por el cual algunos elementos químicos, los radiactivos, emiten radiaciones que tienen la propiedad no solo de impresionar placas fotográficas, sino también ionizar gases, producir fluorescencia, atravesar cuerpos opacos a la luz ordinaria, etc.

Rayo gamma: Onda electromagnética de longitud de onda muy corta, producidas en la desintegración radiactiva o por colisiones de partículas elementales.

Rayos cósmicos: Son partículas provenientes del espacio que bombardean constantemente a la Tierra desde todas las direcciones. La mayoría de estas partículas son núcleos de átomos o electrones. Algunas de ellas son más energéticas que cualquier otra partícula observada en la naturaleza. Los rayos cósmicos ultra-energéticos viajan a una rapidez cercana a la de la luz y tienen cientos de millones de veces más energía que las partículas producidas por cualquier acelerador en el mundo.

Relatividad especial: Teoría de Einstein basada en la idea de que las leyes de la física deben ser las mismas para todos los observadores que se mueven libremente y que la rapidez de la luz en el vacío es una constante universal, no importa cual sea el estado de movimiento del observador o la fuente emisora de la luz.

Relatividad general: Teoría de Einstein basada en la idea de que las leyes de la física deben ser las mismas para todos los observadores, no importa como se estén moviendo. Explica la fuerza de gravedad en términos de la curvatura del espacio-tiempo de cuatro dimensiones.

Semivida o período de semidesintegración: Intervalo de tiempo que transcurre hasta que la cantidad de núcleos radiactivos de un isótopo radiactivo se reduce a la mitad de la cantidad inicial.

Singularidad: Un punto que no pertenece al espacio-tiempo, debido a que su curvatura es infinita.

Suceso o evento: Un punto en el espacio-tiempo, especificado por su tiempo y su posición espacial.

Teoría de campo unificado: Teoría desconocida, que unifica las fuerzas electromagnéticas, fuerte, débil y gravitacional.

Apéndice B

Elementos de ondas

Cuando un medio es perturbado, por ejemplo una piedra que impacta el agua, la perturbación es capaz de propagarse. Denominamos *Onda*, a la propagación de una perturbación.





Figura B.1: Una piedra impactando el agua es una perturbación (izquierda). La perturbación se propaga a través del agua como ondas (derecha).

Podemos observar algunas características de las ondas producidas en el agua, la primera es que se propaga en círculos concéntricos, esto se debe a que el medio, en este caso el agua, es homogéneo, por ello la onda se propaga a la misma rapidez en cualquier dirección. Otra cosa que podemos observar es que un objeto que flote sobre el agua, como un trozo de corcho, se desplaza arriba y abajo al ser alcanzado por las olas, de aquí podemos deducir dos cosas, las olas transportan energía, toda vez que pueden desplazar al cuerpo que flota, lo otro es que no desplazan a dicho objeto en la dirección en que avanzan las ondas.

En general, en todo fenómeno de propagación de ondas, podemos observar algunos elementos comunes:

1. La perturbación inicial que se *propaga* de un punto a otros desde un foco emisor, y sin desplazamiento neto de la materia.

2. *Transmisión de energía* a través de un medio.

3. La perturbación se propaga a *rapidez finita*, esto es, tarda tiempo en alcanzar sucesivamente los puntos más alejados.

Las ondas, que denominaremos *mecánicas*, se propagan a través de algún medio material elástico, como el aire, el agua o una cuerda. Son ejemplos de ellas las olas, las ondas en cuerdas y las ondas sonoras.

Las ondas mecánicas se clasifican de acuerdo a la dirección de oscilación de las partículas del medio respecto de la dirección de propagación de la onda en: transversales, longitudinales y de superficie.

Ondas Transversales: la dirección de propagación es perpendicular a la dirección de oscilación de las partículas del medio perturbado. Las ondas en cuerdas son ejemplo de ondas transversales.

Ondas Longitudinales: la dirección de propagación es paralela a la dirección de oscilación de las partículas del medio perturbado. Las ondas producidas en resortes por compresiones y expansiones son ejemplo de ondas longitudinales.

Ondas Superficiales: las partículas oscilan tanto paralela como perpendicularmente a la dirección de propagación de la onda. Las ondas en líquidos, como las olas, son ejemplo de ondas superficiales.

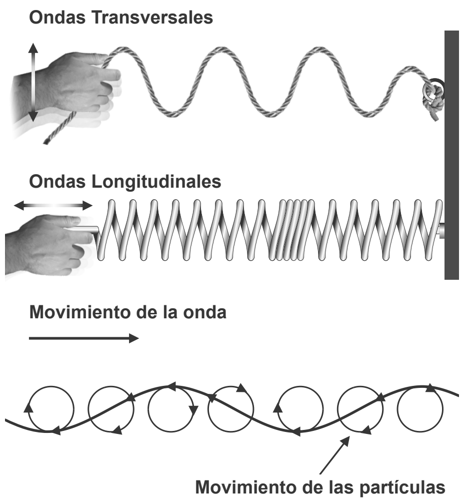


Figura B.2: Ondas longitudinal (arriba), transversal (medio) y de superficie (abajo).

B.1. Ondas armónicas

Se denominan *ondas armónicas* a aquellas producidas por perturbaciones periódicas producidas en un medio elástico por un *movimiento armónico simple*. Un movimiento armónico simple es un movimiento periódico que queda descrito por una función armónica, esto es, una función sinusoidal[1].

B.1.1. Características de las ondas armónicas

Existe una serie de magnitudes que caracterizan las ondas armónicas transversales y las ondas armónicas longitudinales.

B.1.1.1. Características de las ondas armónicas transversales

Consideremos la producción de una onda periódica transversal en una cuerda tensa. Cada elemento de cuerda oscilará armónicamente en dirección vertical. Si las vibraciones que aplicamos al extremo de la cuerda se suceden de forma continuada se forma un *tren de ondas* que se propagará a lo largo de la cuerda.

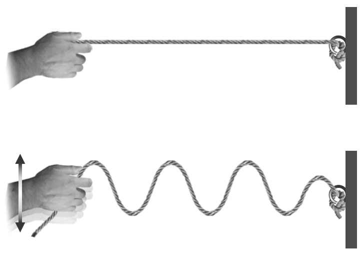


Figura B.3: Ondas transversales en una cuerda.

Se denomina *elongación* a la distancia comprendida entre la posición de equilibrio de un elemento de cuerda y la posición en que se encuentra en un instante determinado. La máxima elongación es denominada *amplitud* de la onda (A). Las unidades de elongación y amplitud en el sistema internacional de medidas (SI) es el metro.

Se denomina *ciclo* de una onda a una oscilación completa de un elemento del medio por el que se propaga una onda.

[1] Una función sinusoidal es una función que oscila entre dos valores y matemáticamente está dada por la función seno o coseno.

Se denomina *frecuencia* (f) al número de ciclos que pasan por un punto del medio por unidad de tiempo. También puede definirse como el número de oscilaciones que efectúa un elemento del medio por unidad de tiempo. Su unidad en el SI es el hertz [Hz], y equivale a [s^{-1}].

Se denomina *período* (T) al tiempo que emplea un elemento del medio afectado por la perturbación, en efectuar una oscilación completa.

Se denomina *longitud de onda* (λ) a la mínima distancia entre dos elementos consecutivos del medio que se encuentran en el mismo estado de vibración. Su unidad en el SI es el metro.

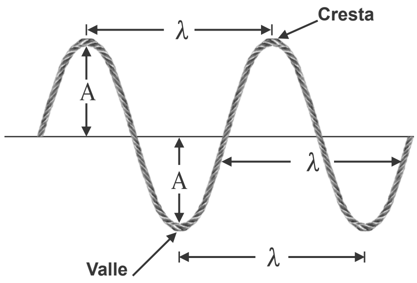


Figura B.4: Elementos de una onda armónica.

Las ondas transversales tienen crestas y valles. La *cresta* es el punto que ocupa la posición más alta en una onda y el *valle* es el punto más bajo de la onda. El punto del medio material que no tiene desplazamiento vertical, es decir, cuya elongación es cero, se denomina *nodo*.

B.1.1.2. Características de las ondas armónicas longitudinales

Consideremos un resorte o muelle horizontal con un extremo fijo, que se encuentra a su largo natural, y al que aplicamos un movimiento repentino de compresión y expansión (figura B.5 arriba). El incremento de presión las espiras se comprimen y la región comprimida se propaga a la vecina, y una vez que la compresión o pulso ha pasado, las espiras han retornado a su posición anterior (figura B.5 medio) por efecto de la disminución de presión provocada por su desplazamiento. La repetición periódica de pulsos provoca la aparición de un tren de ondas, donde cada zona comprimida va seguida de una zona distendida, estas son las llamadas *zonas de compresión* y *zonas de dilatación* o de *rarefacción* (figura B.6 arriba). Debido a lo anterior, las ondas longitudinales reciben también el nombre de *ondas de presión* o de *compresión*.

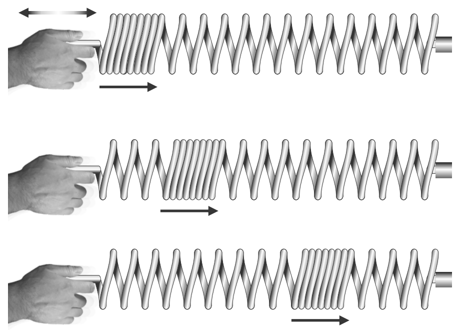


Figura B.5: Pulso de compresión desplazándose por un resorte.

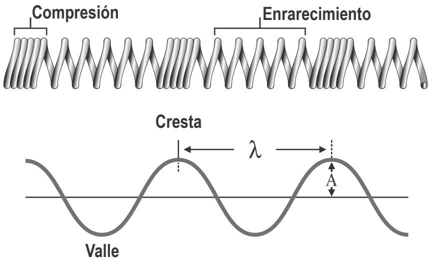


Figura B.6: Elementos de una onda longitudinal.

Si graficamos la elongación de los elementos del resorte se obtiene una curva sinusoidal (figura B.6 abajo). Los desplazamientos en la dirección de propagación serán positivos y los desplazamientos en dirección opuesta serán negativos. Por lo que, en una onda armónica longitudinal, al igual que en una onda armónica transversal, las magnitudes características son: la longitud de onda, la amplitud de la onda, el período, y la frecuencia.

El movimiento ondulatorio armónico sigue una ley doblemente periódica, es decir, la perturbación depende tanto del tiempo como de la posición en el medio de propagación. Para estudiar esta doble periodicidad mantengamos fija una de las variables. Si fijamos la posición, esto es como seguir la vida de un elemento del medio, la curva de la figura B.7

izquierda muestra cómo varía la elongación para dicho elemento del medio en función del tiempo. Por otra parte, si fijamos el tiempo, esto es como tomar una fotografía. La curva de la figura B.7 derecha muestra cómo varía la elongación en función de la posición (x) para un instante t fijo.

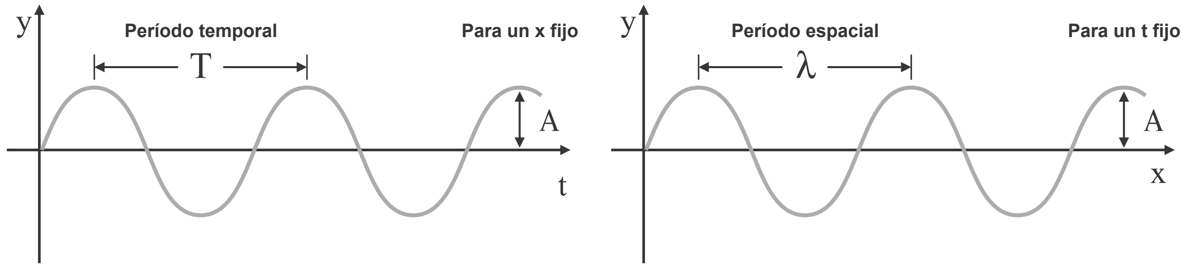


Figura B.7: Doble periodicidad de la función de onda, a la izquierda se muestra la gráfica de la elongación para un x fijo y a la derecha la gráfica de la elongación para un t fijo. Los períodos son dos, el espacial (λ) y el temporal (T) respectivamente.

B.2. Efecto Doppler

Supongamos que lanzamos a intervalos regulares varias piedras una al lado de la otra sobre una misma línea (figura B.8). Ubiquemos a dos observadores en ambos extremos de la fuente de agua, pero sobre la misma línea en la que caen las piedras.

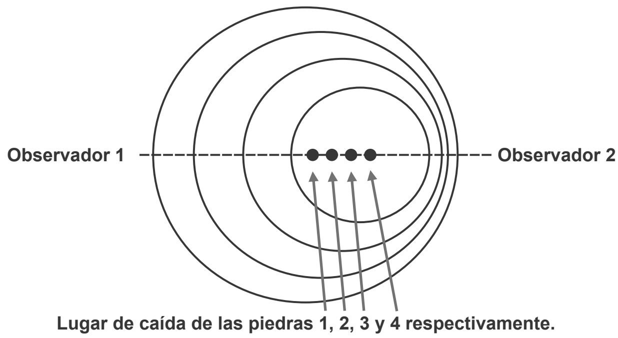


Figura B.8: Un observador y/o la fuente perturbadora en movimiento relativo.

¿Medirán la misma distancia entre las crestas de las ondas en el agua?

Claramente no, el observador 1 medirá una mayor distancia entre las crestas y el observador 2 medirá una menor distancia entre las crestas, es decir, la longitud de onda medida por el observador 1 aumenta y la medida por el observador 2 disminuye.

Lo mismo ocurre con la frecuencia, el observador 1 observa que las ondas llegan con menor frecuencia y el observador 2 observa que las ondas llegan con mayor frecuencia.

Observe que ahora los círculos no son concéntricos, pues el lugar de perturbación se está desplazando, esto produce que distintos observadores midan distintas frecuencias y distintas longitudes de onda.

Al cambio de frecuencia y longitud de onda producto del movimiento de la fuente de ondas o del receptor se denomina *efecto Doppler*, en honor de *Christian Doppler* (1803 - 1853).

B.2.1. Efecto Doppler en ondas de sonido

Al igual que las ondas en el agua, las ondas sonoras se propagan en el espacio tridimensional, pero en vez de círculos tendremos ondas que se propagan de forma esférica, aunque se produce el mismo efecto tanto si la fuente sonora como el receptor se mueven.

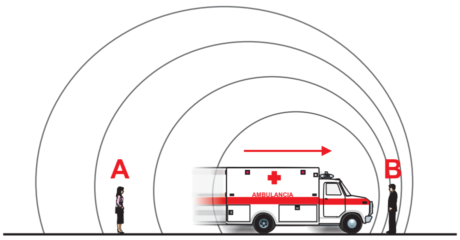


Figura B.9: Dos observadores oyen de manera distinta la sirena de una ambulancia que se aleja (izquierda) y se acerca (derecha).

El efecto Doppler en ondas sonoras se puede evidenciar al oír como cambia el tono de la sirena de una ambulancia, bomberos o la policía.

¿Recuerda la última vez que sintió la sirena de uno de estos vehículos?

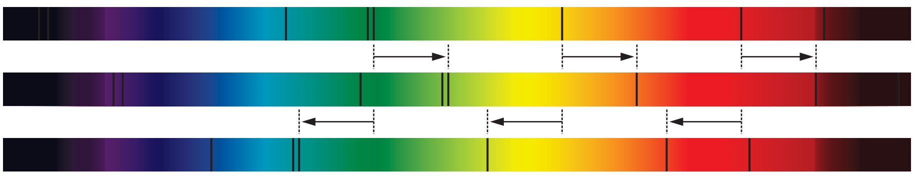
Seguramente recordará que el tono que sintió cuando se acercaba cambió cuando se alejaba. Esto se debe a que las crestas de las ondas sonoras llegan al oído con mayor frecuencia cuando la fuente sonora se acerca y con menor frecuencia cuando se aleja.

B.2.2. Efecto Doppler en ondas electromagnéticas

El efecto Doppler también aparece en las ondas electromagnéticas (Apéndice C). La luz visible es un pequeño grupo de ondas electromagnéticas.

El efecto Doppler en ondas electromagnéticas es una herramienta fundamental en astronomía, ya que permite medir indirectamente rapidez de acercamiento o alejamiento de los cuerpos celestes (velocidad radial).

El uso del efecto Doppler en astronomía se basa en el hecho que el espectro de radiación electromagnética no es continuo, las discontinuidades (líneas oscuras) son llamadas líneas espectrales (Apéndice C) de absorción (figura B.10).


Figura B.10: Espectros en luz visible con líneas de absorción (líneas oscuras). El espectro superior corresponde al espectro que se observa cuando el observador y la fuente están en reposo relativo. Cuando el observador y/o la fuente se alejan, las líneas de absorción se desplazan hacia el rojo (espectro central) y cuando se acercan, las líneas de absorción se desplazan hacia el azul (espectro inferior).

Las líneas espectrales de absorción se caracterizan por la disminución de radiación a una longitud de onda y frecuencia específica, y se producen por la absorción de esas ondas por átomos o moléculas que poseen los mismos cuerpos celestes que producen la radiación, o por átomos o moléculas que se encuentran en el espacio o en nuestra atmósfera. Por ejemplo si pudiéramos observar el espectro del ultravioleta que recibimos en la superficie de la Tierra, evidenciaríamos líneas oscuras justo en la longitudes de onda que absorbe el ozono.

Si el cuerpo celeste emisor de radiación está en movimiento respecto de la Tierra, las líneas espectrales de absorción se desplazarán respecto de aquellas producidas por una fuente en reposo, desplazándose hacia el rojo o el azul dependiendo si el observador y la fuente (o uno de ellos) se alejan o acercan entre si.

B.3. Principio de Huygens

Muchos fenómenos ondulatorios pueden ser interpretados haciendo uso del principio propuesto en 1678 por el físico y astrónomo holandés *Christiaan Huygens* (1629 - 1695), para corroborar su modelo ondulatorio de la luz. Este principio es aplicable a todo tipo de ondas y proporciona una interpretación general y sencilla de dichos fenómenos ondulatorios.

Antes de enunciar dicho principio introduciremos algunos conceptos:

Frente de onda o superficie de onda: Dado un foco productor de ondas en un medio homogéneo e isótropo, un frente de onda es la superficie constituida por todos los puntos que en un momento dado vibran en concordancia de fase. Las distintas superficies de onda, alejadas entre sí una distancia igual a la longitud de onda, reúne todos los puntos del medio que se hallan en el mismo estado de vibración.

Rayos: Son las rectas que indican la dirección de propagación del movimiento ondulatorio. Estas rectas son normales a los frentes de onda en cada uno de sus puntos.

Superficie de onda plana: Si consideramos frentes de onda esféricos suficientemente alejados del foco emisor, los rayos serán prácticamente paralelos entre sí y cada superficie de onda puede considerarse plana.

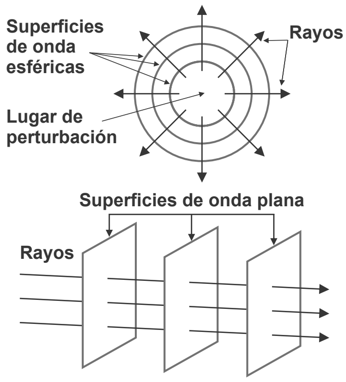


Figura B.11: Representación de rayos para la propagación y de frentes de onda.

El *principio de Huygens* afirma que todo punto de un frente de onda se convierte en un centro puntual productor de ondas secundarias, de igual velocidad y frecuencia que la onda inicial, cuya superficie envolvente constituye un nuevo frente de onda.

El principio de Huygens asigna una propiedad fundamental a cada uno de los puntos de un frente de onda que permite predecir cómo será el nuevo frente en un instante posterior. Así, conociendo los sucesivos frentes de onda, es posible saber cómo tendrá lugar la propagación de un movimiento ondulatorio determinado.

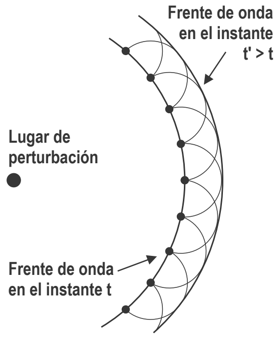


Figura B.12: Según el principio de Huygens todo punto de un frente de onda se convierte en un centro puntual productor de ondas.

B.4. Transición entre dos medios

Cuando una onda que se propaga por un medio alcanza la superficie que le separa de otro medio de distinta naturaleza (interfaz), produciendo una onda que se devuelve al medio de procedencia: decimos entonces que la onda se ha *reflejado*. Al mismo tiempo, cuando una onda se transmite al segundo medio decimos entonces que la onda se ha *refractado*.

Hay varias formas de comprender los fenómenos de reflexión y refracción, uno de ellos es a través de la aplicación del principio de Huygens:

El fenómeno de la reflexión corresponde a la generación de un frente de onda secundario que se devuelve al medio cuando una onda llega a una superficie de separación de dos medios. Se observa que cuando la reflexión ocurre sobre un medio más denso la onda re-

flejada invierte su fase (figura B.13), y si la reflexión ocurre sobre un medio menos denso la onda reflejada no cambia su fase.

El fenómeno de la refracción corresponde a generación de un frente de onda secundario en el segundo medio cuando una onda llega a una superficie de separación de dos medios.

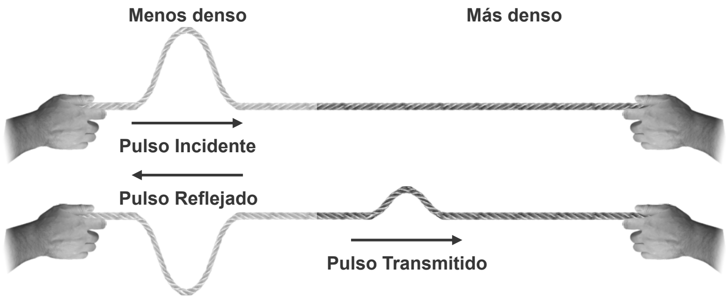


Figura B.13: Cuando las ondas pasan a un medio más denso, la onda reflejada invierte su fase.

B.5. Fenómenos por superposición de ondas

Hasta ahora hemos considerado el comportamiento de una sola onda procedente de un foco emisor. Si dos o más ondas procedentes de focos diferentes se encuentran simultáneamente en algún punto del medio, la elongación de dicho punto es suma de las que experimentaría si fuera alcanzado por cada una de las ondas por separado. Este es el *principio de superposición* de ondas. La superposición de dos o más ondas en un punto del medio se denomina *interferencia*.

Las ondas luego de superponerse o interferir, continúan su propagación independientemente sin sufrir modificación alguna. Ejemplo de lo anterior son las olas o el sonido, donde podemos escuchar sonidos producidos por diferentes fuentes, sin perturbación del sonido original, pese a haber tenido lugar diversas interferencias.

La superposición de ondas permite entender la naturaleza de algunos fenómenos como la difracción, la polarización y la formación de ondas estacionarias, que estudiaremos a continuación.

B.5.1. Difracción

Supongamos que producimos ondas planas en una cubeta de ondas, y que a cierta distancia del foco ponemos un obstáculo en el camino con una delgada rendija (figura B.14). Si el ancho de la rendija es mayor a la longitud de onda se propagan siguiendo la dirección rectilínea de los rayos que parten de la fuente, en cambio, si el ancho de la abertura es comparable a la longitud de onda, los rayos cambian su dirección al llegar a ella.

La desviación en la propagación rectilínea de las ondas, cuando éstas atraviesan una abertura o pasan próximas a un obstáculo, recibe el nombre de *difracción*.

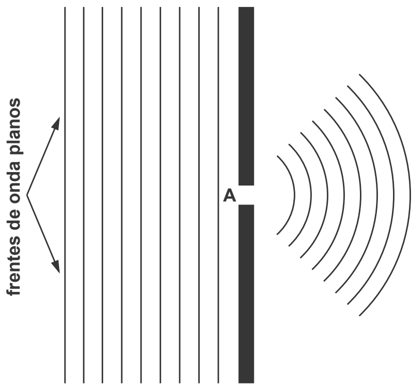


Figura B.14: Difracción por una rendija.

La difracción puede explicarse usando el principio de Huygens: la rendija se comporta como un centro emisor de ondas, lo que permite a la onda propagarse detrás del obstáculo.

La difracción también se produce si las ondas llegan a la esquina de un objeto o si son interceptadas por algún obstáculo, siempre que su tamaño sea igual o menor a la longitud

de onda. En este último caso, las ondas parecen rodear el objeto y alcanzan puntos ocultos al foco. Por ello, percibimos las ondas sonoras aunque se interponga algún obstáculo en su propagación.

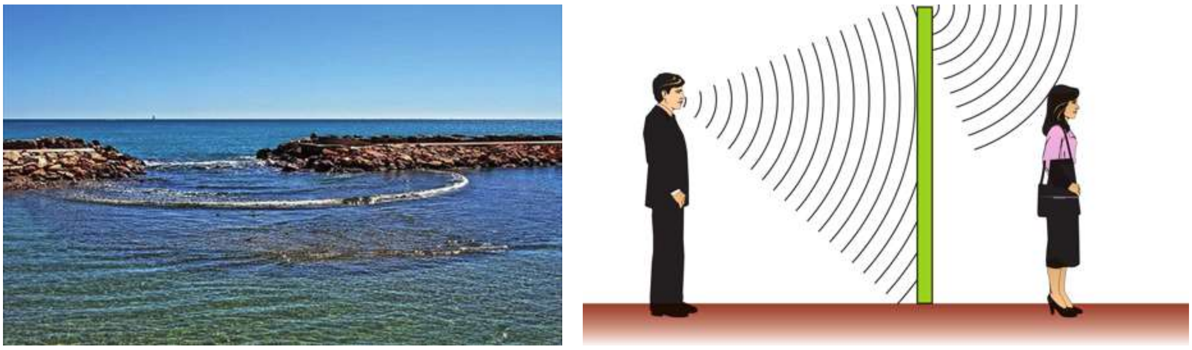


Figura B.15: Difracción de olas por una rendija (izquierda) y difracción de sonido por un obstáculo (derecha).

La difracción de las ondas es una propiedad característica de éstas que permite evidenciar si un fenómeno es de naturaleza ondulatoria.

B.5.2. Polarización

Un fenómeno ondulatorio de gran importancia y que solo ocurre en ondas transversales es la polarización.

Se dice que una onda no está polarizada cuando son igualmente posibles todas las direcciones de oscilación de las partículas del medio, o cuando la onda es la resultante de la superposición de muchas ondas cuyas vibraciones tienen lugar en distintas direcciones, como en el caso de la luz.

B.5.2.1. Polarización lineal

Una onda tiene polarización lineal cuando la dirección de oscilación de las partículas es única y se mantiene fija.

Un ejemplo de onda polarizada linealmente es la que producimos cuando se sacude arriba y abajo el extremo libre de una cuerda fija en el otro extremo, ya que todos sus puntos oscilan siempre en la dirección vertical. Una onda en una cuerda se puede polarizar linealmente al hacerle atravesar una rendija situada en determinada dirección. La rendija sólo permite la transmisión de la componente (análogamente a la proyección de vectores) de la onda que vibra a lo largo de ella.

Se denomina *plano de polarización* al formado por la dirección de oscilación y de propagación. Si elegimos el eje x en la dirección de propagación y el eje y en la dirección de oscilación, entonces el plano de polarización es el plano XY.

B.5.2.2. Polarización circular y elíptica

Una onda tiene *polarización circular* cuando la dirección de oscilación de las partículas cambia regularmente de dirección.

Una onda tiene *polarización elíptica* cuando la dirección de oscilación de las partículas cambia regularmente de dirección y además cambia cíclicamente de amplitud.

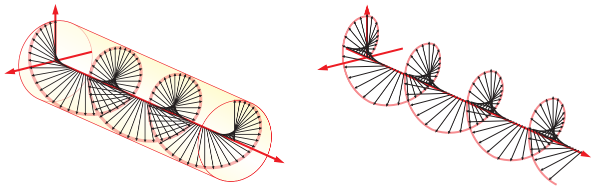


Figura B.16: Onda con polarización circular (izquierda) y onda con polarización elíptica (derecha).

Este tipo de polarización puede obtenerse haciendo vibrar el extremo libre de una cuerda tensa, de modo que formemos círculos o elipses, manteniendo paralelos los planos de vibración (plano perpendicular a la dirección de propagación).

B.5.3. Interferencia de dos ondas armónicas coherentes

Supongamos que en cierto punto interfieren dos ondas armónicas coherentes, esto es, que están en fase o cuya diferencia de fase es constante. Por simplicidad, supondremos que tienen la misma frecuencia, amplitud, longitud de onda, velocidad, y polarización.

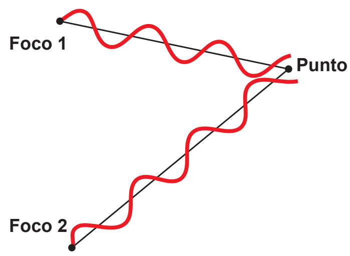


Figura B.17: Dos ondas coherentes que interfieren en un punto.

Si se aplica el principio de superposición se obtiene que la elongación resultante depende de la diferencia de recorridos entre el punto en cuestión y cada una de las dos fuentes, y aparecen puntos donde la amplitud es siempre cero. Se denomina *interferencia constructiva* cuando la amplitud resultante es máxima e *interferencia destructiva* cuando la amplitud resultante es nula.

Ocurrirá interferencia constructiva cuando la diferencia de recorrido sea igual a un número entero de longitudes de onda, de esta forma, las ondas que interfieren se encuentran en fase. La amplitud de la onda resultante es máxima, e igual al doble de la amplitud de las ondas componentes, en los puntos en que la diferencia de recorrido de las ondas es cero o un número entero de longitudes de onda, ya que, las ondas llegan en concordancia de fase a estos puntos.

Ocurrirá interferencia destructiva cuando la diferencia de recorrido sea un número impar de semilongitudes de onda, ya que si esto ocurre las ondas que interfieren se encuentran en contrafase en el punto. La amplitud de la onda resultante es cero.



Figura B.18: Líneas ventrales y líneas nodales en la interferencia de dos fuentes coherentes.

Los puntos en los que se produce la interferencia constructiva u destructiva reciben los nombres de *vientres* y *nodos* respectivamente. Las líneas que los unen se denominan, respectivamente, *líneas ventrales* y *líneas nodales* (figura B.18). Cada línea ventral o nodal está formada por los puntos cuya diferencia de distancias a dos puntos fijos, los focos de ambas ondas, es una constante.

En el caso más general de interferencia de ondas de la misma frecuencia pero diferente amplitud, las condiciones para que se produzca interferencia constructiva o destructiva son las mismas que hemos obtenido anteriormente, sin embargo, la interferencia destructiva

no es destructiva propiamente tal ya que la amplitud de la onda no llega a anularse en ningún punto.

B.5.4. Ondas estacionarias

La superposición de dos ondas armónicas de la misma naturaleza con igual amplitud y longitud de onda (o frecuencia), que viajan en direcciones opuestas a través de un medio, forma una onda de la misma frecuencia de las ondas que interfieren, y la amplitud de la oscilación no es la misma para todos los puntos, sino que depende de su posición, existiendo puntos que no vibran (nodos), y que permanecen inmóviles, es decir, son estacionarios, mientras que otros (vientres o antinodos) lo hacen con una amplitud de vibración máxima, igual al doble de la de las ondas que interfieren, y con una energía máxima. Este tipo de onda es denominada *onda estacionaria*, debido a la inmovilidad de los nodos.

Estas ondas se producen, por ejemplo, cuando un medio limitado, como un tubo o una cuerda, se ve afectado por un movimiento ondulatorio; las ondas estacionarias son provocadas por las reflexiones que este movimiento experimenta en los extremos del medio.

Si se aplica el principio de superposición se obtiene que la elongación resultante es armónica de igual frecuencia que las componentes y su amplitud A_r, varía sinusoidalmente con la abscisa x y es independiente del tiempo.

Debido a que los nodos se encuentran siempre en reposo, la onda estacionaria parece permanecer fija sobre la dirección de propagación por lo que *no viaja* y por lo tanto, la onda estacionaria no transporta energía.

Los vientres o antinodos de la onda estacionaria ocurren a distancias de $\lambda/2$ de un foco. Los nodos de la onda estacionaria ocurren a distancias de un número impar de cuartos de longitud de onda de un foco.

B.5.4.1. Ondas estacionarias en una cuerda

Entre las ondas estacionarias destacan las producidas en una cuerda flexible tensa, con uno o dos de sus extremos fijos. Como en toda onda estacionaria, los puntos de la cuerda, exceptuando los nodos, oscilan al mismo tiempo con movimiento armónico de igual frecuencia aunque de amplitud variable que depende de su posición.

A modo de ejemplo veamos la formación de ondas estacionarias en una cuerda con extremos fijos.

Consideremos una cuerda de longitud L, fija por sus extremos en la cual se produce una onda que viaja hasta los extremos fijos, donde producto de la reflexión de la onda, se producen ondas que viajan en dirección contraria.

A determinadas frecuencias se producirán ondas estacionarias. Cada una de las ondas estacionarias que se forman tienen una frecuencia característica y se denomina modo normal de vibración.

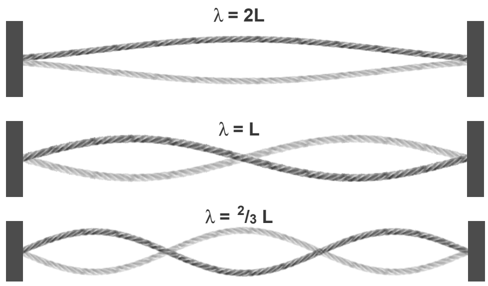


Figura B.19: A determinadas frecuencias se producirán ondas estacionarias en la cuerda.

Los extremos de la cuerda, de abscisas 0 y L, deben ser nodos, ya que estos puntos están fijos en los extremos.

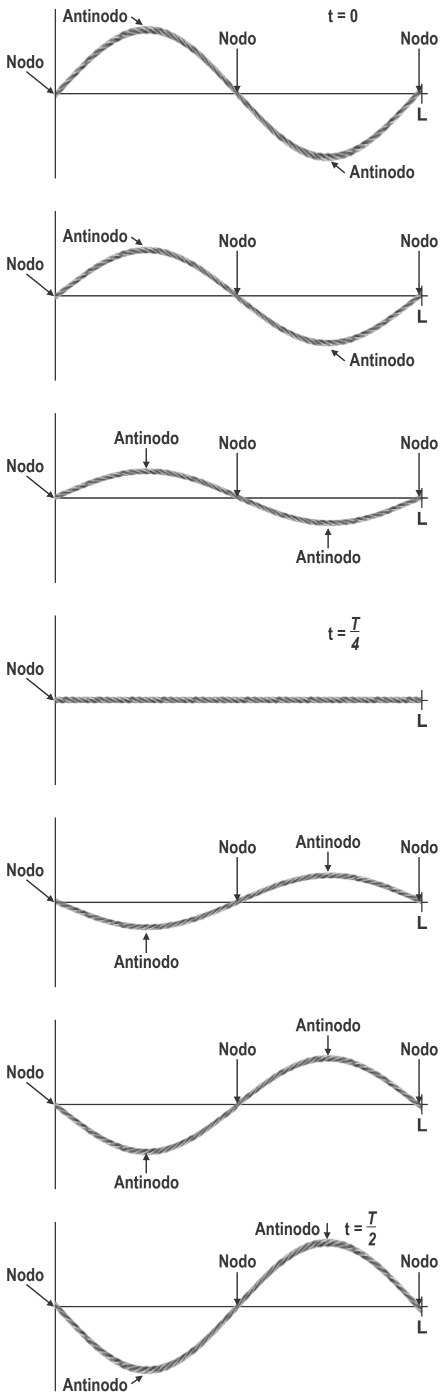


Figura B.20: Imágenes de distintos instantes de oscilación de una onda estacionaria en una cuerda.

Para determinar las longitudes de onda de cada uno de los modos normales de vibración, debemos tener en cuenta que en toda onda estacionaria la distancia entre nodos consecutivos vale $\frac{\lambda}{2}$. Por lo tanto, la formación de ésta requiere que la longitud de la cuerda sea igual a un número entero de semilongitudes de onda:

$$L = n\frac{\lambda}{2}$$

De aquí tenemos:

$$\lambda_n = \frac{2L}{n} \qquad n = 1, 2, 3...$$

Evaluando los distintos valores de n obtenemos:

$$\lambda_1 = 2L$$
$$\lambda_2 = L$$
$$\lambda_3 = \frac{2L}{3}$$
$$\vdots$$

Cada modo normal tiene asociada una "frecuencia" que depende de la velocidad de propagación de las ondas en la cuerda:

$$f_n = \frac{v}{\lambda} = n\frac{v}{2L} \qquad n = 1, 2, 3$$

Evaluando los distintos valores de n obtenemos:

$$f_1 = \frac{v}{2L}$$
$$f_2 = \frac{v}{L}$$
$$f_3 = \frac{3v}{2L}$$
$$\vdots$$

La frecuencia menor se denomina *frecuencia fundamental* o *primer armónico*; la siguiente, segundo armónico; y así, sucesivamente, constituyendo una serie armónica.

B.5.5. Pulsaciones

Una situación de especial interés se produce cuando en un punto interfieren dos ondas de frecuencias levemente distintas.

En la figura B.21 se muestran dos ondas de la misma amplitud y distinta frecuencia y la onda resultante obtenida sumando las oscilaciones componentes. La consecuencia es que la amplitud de la onda resultante en ese punto varía periódicamente con el tiempo, pasando sucesivamente por valores máximos y mínimos. Estas variaciones periódicas que experimenta la amplitud reciben el nombre de pulsaciones.

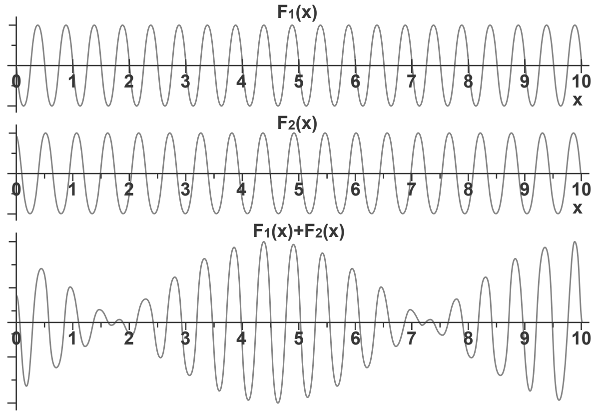


Figura B.21: Superposición de dos ondas de frecuencias levemente distintas.

Se denomina pulsaciones a las variaciones periódicas de la amplitud de la onda producida por la interferencia de dos ondas de frecuencias ligeramente diferentes.

La frecuencia con la que un punto dado se convierte en nodo se denomina *frecuencia de pulsación*.

Este fenómeno sucede, por ejemplo, haciendo vibrar a la vez dos diapasones o dos cuerdas de guitarra que produzcan frecuencias muy poco diferentes: percibimos un sonido semejante al producido por cada onda individual pero con altibajos periódicos en la intensidad del sonido. Las pulsaciones se perciben como una intensificación de la sensación sonora cada vez que se produce un máximo en la onda resultante, ya que la intensidad de la onda es proporcional al cuadrado de la amplitud.

B.5.5.1. Características de las pulsaciones

La amplitud de la onda resultante varía sinusoidalmente con el tiempo. Se dice que tiene la *amplitud modulada* y es el principio en que están basadas las emisiones radiofónicas AM.

La frecuencia de la onda resultante es igual al promedio de ambas. La frecuencia de la pulsación, es decir, el número de pulsaciones por segundo, es igual a la diferencia de las frecuencias de las dos ondas que interfieren.

B.6. Ondas sonoras

La vibración de las cuerdas de una guitarra, la de una campana, un timbre eléctrico, una copa de cristal o la de nuestras cuerdas vocales mueve las capas de aire del entorno. Estas vibraciones de los cuerpos se transmiten mediante un movimiento ondulatorio.

Si la vibración llega a través del aire a nuestro oído, provoca en el tímpano vibraciones que son transmitidas al oído interno y, de allí, al cerebro, produciendo una sensación que llamamos *sonido*.

El sonido es una vibración o perturbación mecánica de algún cuerpo que se propaga en forma de ondas a través de cualquier medio elástico.

La onda mediante la cual se propaga el sonido a través de un medio material elástico se denomina *onda sonora*.

El sonido está definido por el intervalo de frecuencias que es capaz de oir una persona, en promedio dicho intervalo se encuentra entre los 20 [Hz] a 20.000 [Hz]. Bajo y sobre ese rango se denominan ondas *infrasónicas* y *ultrasónicas* respectivamente.

Las ondas infrasónicas, son aquellas cuyas frecuencias están por debajo del intervalo audible (frecuencias inferiores a 20 [Hz]), son las generadas, por ejemplo por los temblores de tierra.

Las ondas ultrasónicas, cuyas frecuencias están por encima del intervalo audible (frecuencias superiores a 20.000 [Hz]), son las generadas, por ejemplo, al inducir vibraciones en un cristal de cuarzo con un campo eléctrico alterno.

B.6.1. Mecanismo de formación de las ondas sonoras

Las ondas sonoras son el ejemplo más importante de ondas longitudinales. Consisten en sucesivas compresiones y dilataciones del medio de propagación, producidas por un foco en movimiento vibratorio (figura B.22).

Al paso de la onda, el medio experimenta variaciones periódicas de presión. Una onda sonora es una *onda de presión*.

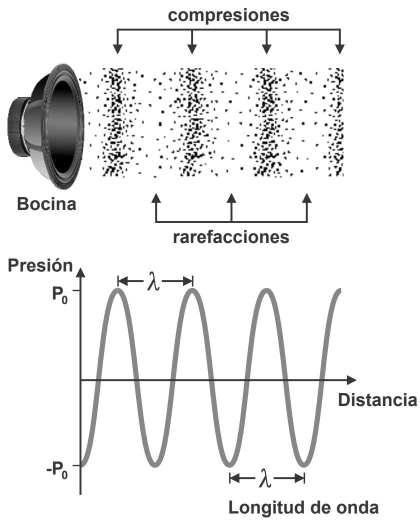


Figura B.22: Ondas de presión producidas por una bocina o parlante.

La figura B.22 muestra el mecanismo de formación y propagación de las ondas sonoras unidimensionales, mediante una bocina vibratoria. Cuando la bocina oscila hacia la derecha, el gas se comprime en la región más próxima a éste aumentando la presión y la densidad del gas. Se forma un pulso de compresión que viaja hacia la derecha. Cuando la bocina oscila hacia la izquierda, el gas próximo a éste se expande disminuyendo su presión y su densidad; se produce un pulso de enrarecimiento que se propaga alejándose de la bocina.

Al oscilar la bocina rápida y periódicamente, se produce un tren de compresiones y enrarecimientos; la onda longitudinal se propaga por el medio (aire), siendo λ la distancia entre dos compresiones o dos enrarecimientos sucesivos.

Cualquier elemento de volumen oscila con movimiento armónico, desplazándose paralelamente a la dirección de propagación de la onda.

La rapidez de las ondas sonoras es independiente de la fuente, pero depende de la naturaleza del medio de propagación. Las ondas sonoras se propagan más rápidamente en los sólidos que en los líquidos y más rápidamente en éstos que en los gases.

La rapidez del sonido en el aire a nivel del mar es aproximadamente de 343 [m/s] (a 20 °C de temperatura, con 50 % de humedad).

B.7. Bibliografía del capítulo

- *Física. Volumen I, Mecánica, Radiación y Calor.* R. Feynman, R. Leighton & M. Sands. *Addison Wesley Iberoamericana.* 1987.
- *Física.* J. Armero, D. Castello, T. García & M. Martínez. *Edebé.* 1999.

Apéndice C

Materia y radiación

La comprensión de la naturaleza y sus leyes a través de la ciencia, la física y la astrofísica en particular, requiere el conocimiento de la teoría de la radiación, la materia y sus interacciones. Revisaremos de manera elemental estos tópicos.

C.1. Teoría de la luz

Desde la antigüedad el hombre ha buscado respuestas acerca de la naturaleza. La luz no es la excepción; por ejemplo, Platón propuso que la luz está compuesta de partículas de diferentes tamaños y que se mueven a diferentes velocidades, y que estas diferencias de tamaños y velocidades las apreciamos en forma de diferentes colores. Posteriormente la escuela alejandrina predicaba la idea que los ojos emitían rayos de alta velocidad que se reflejaba en los objetos; en particular, *Herón de Alejandría* observó que por ejemplo al parpadear, nuestros ojos pueden ver instantáneamente las estrellas y debido a que están muy lejos concluyó que éstos rayos viajan instantáneamente, es decir, con velocidad infinita.

Ibn Al-Haytham (Alhazen) (965 - 1039) supuso que era el Sol o alguna otra fuente luminosa la que emitía luz y que éstos al ser reflejados llegan a nuestros ojos y nos permiten ver los objetos.

Isaac Newton (1642 - 1727) en el siglo XVII propuso una *teoría corpuscular* de la luz, la cual supone a ésta como un "chorro" de partículas o *corpúsculos. Christiaan Huygens* (1629 - 1695) paralelamente propone la *teoría ondulatoria* de la luz. El comportamiento corpuscular explica satisfactoriamente, a través de la mecánica, fenómenos como la reflexión y refracción, esto sumado a la gran autoridad de Newton, hizo quedar casi en el olvido la teoría ondulatoria; sin embargo, la teoría corpuscular no fue capaz de explicar satisfactoriamente la observación que la velocidad de la luz en un medio más denso que el aire (agua, vidrio, etc.) es inferior a la del vacío.

En el siglo XIX *Thomas Young* (1773 - 1829) y *Augustin-Jean Fresnel* (1788 - 1827) mostraron a través de experimentos de interferencia y difracción, lo inadecuado que resulta la teoría corpuscular para explicar éstos fenómenos, pues en estos experimentos se observan patrones de interferencia (figura C.2), lo que es propio de un fenómeno ondulatorio. El experimento de Young de interferencia de la doble rendija puede explicarse sencillamente mediante ondas en el agua (figura C.1). Consideremos una cubeta de ondas donde existe una "*fuente de ondas*" planas, por ejemplo una barra que perturba el agua oscilando en dirección vertical con una frecuencia determinada. La perturbación es capaz de propagarse, las ondas se encuentran con una pared con dos ranuras, supondremos las paredes de la

cubeta absorbentes, de esta forma, no nos complicaremos con las reflexiones sobre éstas.

La pared que se encuentra en el extremo opuesto a la fuente de ondas, posee un dispositivo móvil que mide la amplitud de la onda resultante y con ello computa la intensidad de la onda resultante, es decir, la cantidad de energía por unidad de tiempo (potencia).

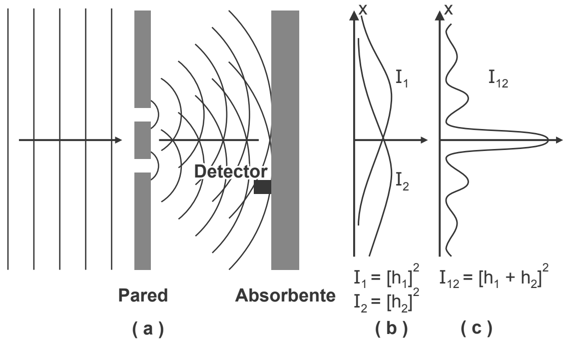
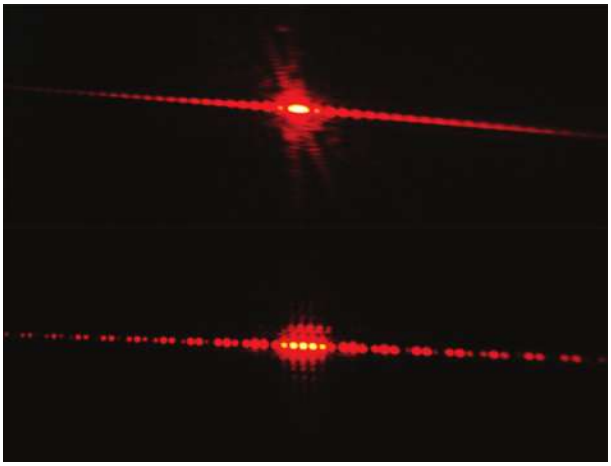


Figura C.1: Experimento de doble rendija con ondas de agua. La parte (b) muestra las curvas que se obtienen cuando solo se encuentra abierta una de las rendijas y en la parte (c) se muestra la curva con ambas rendijas descubiertas.

Si se cubre una de las rendijas, la intensidad resultante tiene la forma de una de las curvas que se muestra en la parte (b) de la figura C.1. La gráfica I_1 se obtiene cuando se cubre la segunda ranura e I_2 cuando se cubre la primera.

Cuando ambas rendijas están descubiertas, se obtiene la curva I_{12} mostrada en la gráfica de la parte (c) de la figura C.1. Esta curva es llamada *patrón de interferencia*, los máximos se obtienen cuando la *interferencia es constructiva* (en fase) y los mínimos cuando la *interferencia es destructiva*. Se produce interferencia constructiva cuando las ondas provenientes de ambas rendijas llegan en fase, es decir, cuando la diferencia entre las distancias del detector a cada rendija sea igual a un número entero de longitudes de onda (λ). Por otra parte se produce interferencia destructiva cuando las ondas provenientes de ambas rendijas llegan en contrafase, es decir, cuando la diferencia entre las distancias del detector a cada rendija sea igual a un número impar de semilongitudes de onda.


Figura C.2: Experimento con luz laser con una (arriba) y dos rendijas (abajo). La intensidad de la luz proyectada en una pared tiene la misma forma que para el caso del agua (figuras C.1 b y c). Fuente: http://courses.umass.edu/plecprep/optics.html.

La discusión de la naturaleza ondulatoria de la luz quedó completamente zanjada cuando *James Maxwell* (1831 - 1879) entrega el marco teórico, al predecir con la teoría electromagnética ondas compuestas por campos eléctricos y magnéticos variables que se propagan tanto por medios materiales como en el vacío. Los experimentos de *Heinrich Hertz* (1857 - 1894) demostraron la existencia de este tipo de ondas. Por otra parte, la predicción de las ondas electromagnéticas venía acompañada de como obtener la velocidad de propagación de estas ondas a partir de un par de constantes (la permititividad y la permeabilidad del vacío) cuyo cómputo arroja un valor muy similar al valor medido de la velocidad de propagación de la luz, así ésta pasó a convertirse en un tipo particular de onda electromagnética.

El estudio de la teoría electromagnética considera aspectos como la electrostática, electrodinámica y asociada a ello los estudios del magnetismo. En particular nos interesa la *interacción eléctrica*. Una partícula con una cierta propiedad llamada *carga*, siente esta interacción producto de otra o varias partículas que poseen esta misma propiedad. Dado

que esta interacción se manifiesta de dos maneras, atracción y repulsión, la carga se ha dividido en dos tipos denominadas *positiva* y *negativa*. La interacción eléctrica es una interacción de largo alcance, *varía con el inverso del cuadrado de la distancia* y gracias a esta característica podemos asociarle un campo, llamado *campo eléctrico*.

Supongamos una partícula con carga que se hace oscilar; el campo oscila con ella, por lo que para un punto fijo respecto de la partícula antes que oscile, el campo eléctrico varía. La oscilación de la partícula puede ser vista como una perturbación, y debido a que un campo eléctrico variable induce un campo magnético y viceversa, dicha perturbación se puede propagar. Esta propagación de la perturbación es la *onda electromagnética* (figura C.3). Las ondas electromagnéticas son transversales, es decir, oscilan perpendicularmente a su dirección de propagación y consiste en campos variables que se propagan por el espacio sin necesidad de medio material y que al encontrar una partícula con carga interactúan con ella.

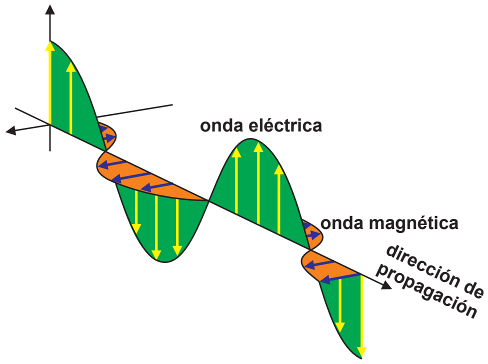


Figura C.3: Una onda electromagnética, es la propagación por el espacio de campos variables. La variación del campo eléctrico induce un campo magnético y viceversa.

Éstas ondas electromagnéticas pueden tener diferentes frecuencias (número de oscilaciones por unidad de tiempo) y estas frecuencias están asociadas a la frecuencia de vibración de las cargas, dependiendo de ésto les llamamos de diferentes maneras. Así, las frecuencias de las ondas electromagnéticas producidas por la corriente eléctrica de la red domiciliaria tiene una frecuencia de 50 o 60 [Hz], oscilaciones cien veces mayores que éste valor se les denomina *ondas de radio* y son las frecuencias usadas para la radiodifusión, frecuencias mayores corresponden a las de uso en TV y FM, frecuencias mayores aún corresponden a las *microondas*, frecuencias usadas por los hornos de microondas, antenas de radar y comunicaciones satelitales. Luego encontramos frecuencias que pueden excitar ciertos órganos de algunos animales y son usados para la visión. Solo un pequeño rango de frecuencias sobre el *infrarrojo* (entre los $5 \cdot 10^{14}$ y los $5 \cdot 10^{15}$ [Hz]) excitan el ojo humano y por ello es denominado el "*espectro visible*", las diversas excitaciones producidas por las diferentes frecuencias se denominan *colores*, más allá del espectro visible se encuentra el *ultravioleta* y luego los *rayos X* y los *rayos gamma*.

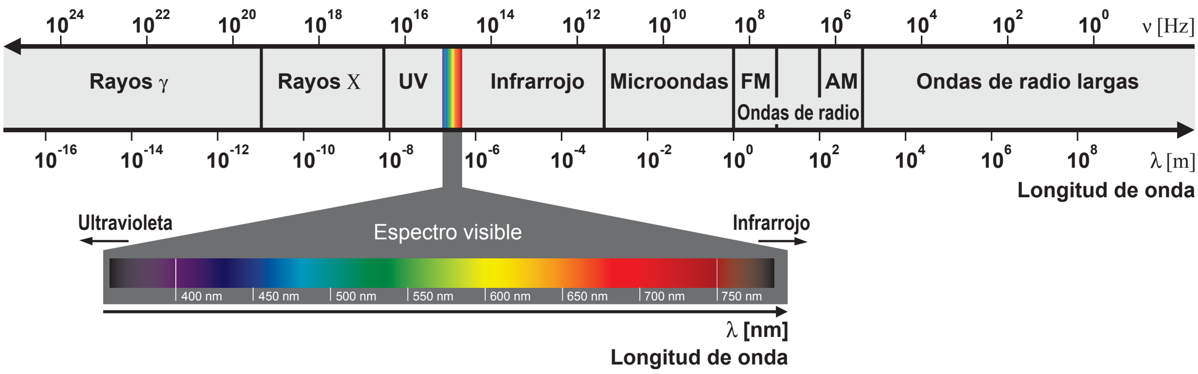


Figura C.4: El espectro electromagnético.

En 1887 H. Hertz, el descubridor experimental de las ondas electromagnéticas, notó que su detector, que emitía una chispa cuando recibía las ondas, chispeaba más intensamente cuando incidía sobre él radiación ultravioleta (UV). Un año más tarde W. Hallwachs, estudiante de Hertz, notó que si se hace incidir radiación UV sobre un metal negativamente cargado, ésta produce su descarga. Esto no ocurría si el metal estaba cargado positivamente, pero si el metal no estaba cargado, la radiación UV hacía que éste adquiriera carga positiva. Si el experimento se repite con luz visible el efecto no ocurre. La radiación electromagnética produce la emisión de electrones denominados *fotoelectrones*.

De los experimentos del denominado *efecto fotoeléctrico*, se observó lo siguiente:

- Para cada sustancia hay una frecuencia mínima o umbral de la radiación electromagnética por debajo de la cual no se producen fotoelectrones por más intensa que sea la radiación.
- La emisión electrónica aumenta cuando se incrementa la intensidad de la radiación que incide sobre la superficie del metal, ya que hay más energía disponible para liberar electrones.

La teoría electromagnética no involucraba de ninguna forma la frecuencia. Según ésta, la emisión de fotoelectrones debe depender solo de la intensidad de la radiación. La explicación solo llegó en 1905 cuando *Albert Einstein* (1879 - 1955) explica la descarga del metal suponiendo que se produce emisión de electrones producto de la absorción de energía luminosa en pequeños "*paquetes de energía*". La idea de absorción o emisión de paquetes de energía había ya sido usada por *Max Planck* (1858 - 1947) en 1900, pero Einstein fue más allá y supuso que la luz misma estaba compuesta de estos "cuantos" de energía reviviendo, con algunas modificaciones, una teoría corpuscular de la luz. A estos corpúsculos posteriormente se les dio el nombre de *fotones*.

Einstein propone que la energía de los fotones está dada por su frecuencia:

$$E = nhf$$

donde h es la constante de Planck y n es un número entero. La expresión de Einstein indica que la energía de los fotones es un múltiplo entero de h veces su frecuencia.

A Einstein se le otorgó en 1921 el premio Nobel por esto y por sus otras contribuciones a la física teórica.

La explicación del fenómeno es la siguiente: los electrones están en el metal igual como si estuvieran encerrados en una caja abierta (conocido como *pozo de potencial*), no pudiendo escapar debido a que no tienen la energía suficiente. Los fotones incidentes son absorbidos por los electrones, entregándoles a éstos su energía, de forma que si esta energía es la suficiente, podrán "saltar" fuera de la caja y escaparse. En experimentos con ciertos metales los fotones visibles no poseían la energía suficiente para producir la emisión de fotoelectrones, pero sí los fotones ultravioleta, esto se debe a que éstos últimos tienen mayor energía pues tienen mayor frecuencia que los visibles.

El efecto fotoeléctrico es la base del funcionamiento de los paneles solares que suministran energía eléctrica a partir de la energía solar, y es ampliamente usado en algunas calculadoras de bolsillo cuya fuente de energía es la luz, es decir, se activan sólo si luz incide sobre una "celda fotoeléctrica" dispuesta en su cara frontal.

Los experimentos de interferometría de *Albert Michelson* (1852 - 1931) y *Edward Morley* (1838 - 1923) inspiraron a que Einstein postulara en 1905 en su teoría de la relatividad

especial *la constancia de la rapidez de la luz en el vacío independiente del estado de movimiento del observador*, es decir, no importando la velocidad con la que se mueva o si está en reposo, siempre medirá el mismo valor de la rapidez de la luz en el vacío, ésta es una característica de los fotones.

Como hemos ya evidenciado tenemos teoría y experimentos que demuestran la naturaleza ondulatoria de la luz (por ejemplo interferencia) y por otra tenemos teoría y experimentos que afirman la naturaleza corpuscular de la luz (por ejemplo el efecto fotoeléctrico). La teoría cuántica acepta la *naturaleza dual* de la luz, ésta se comporta en ciertas ocasiones como onda (cuando se propaga) y en otras como partícula (cuando interactúa con la materia) y son los experimentos los que logran evidenciar una u otra componente de esta dualidad.

C.2. Teoría de la materia

C.2.1. Primeros modelos atómicos

Los modelos de la estructura de la materia tienen un origen en la antigua grecia. Aún sobrevive en el consciente colectivo la doctrina de *Empédocles* (492 - 435 a. de C.) quien supuso que las cosas están compuestas de cuatro elementos: tierra, agua, aire y fuego. Ideas que posteriormente son apoyadas por *Aristóteles* (384 - 322 a. de C.). *Demócrito* (460 - 370 a. de C.) supone que el mundo está hecho de infinitas partículas muy pequeñas que llamó "*átomos*", que significa "*indivisibles*", cuyas diversas formas y combinaciones dan lugar a la diversidad de la materia que observamos.

Ya en tiempos modernos, en 1804 *John Dalton* (1766 - 1844) reintroduce el concepto atómico, que resulta adecuado para dar cuenta del modelo cinético de la materia. Posteriormente en 1897 *Joseph Thomson* (1856 - 1940) descubre corpúsculos cargados negativamente a los cuales midió su razón carga/masa y propone que es una partícula subatómica, más tarde denominada *electrón*. En 1906 se le otorga el premio Nobel por sus trabajos sobre la conducción de la electricidad a través de los gases.

Considerando al electrón como un constituyente del átomo, Thompson propone un modelo atómico conocido como el "*budín de pasas*", que consiste en una esfera con cierto número de electrones incrustados, y una cantidad igual de carga positiva distribuida uniformemente sobre toda la esfera.

Hans Geiger (1882 - 1945) y *Ernest Marsden* (1889 - 1970) investigaron la estructura de la materia a través de experimentos de dispersión (scattering), bombardeando una lámina de oro de menos de un micrómetro de espesor con partículas alfa[1] (figura C.5), que provenían de la desintegración del radio.

Las trayectorias seguidas por las partículas alfa de baja energía (figura C.5) mostraron la necesidad de abandonar el modelo atómico de Thomson debido a que se hacía evidente que el átomo era prácticamente vacío. La reflexión de unas pocas partículas alfa en ángulos muy grandes mostraron la existencia de una parte rígida de carga positiva que se denominó núcleo el cual debía ser muy pequeño. Así, en 1911 *Ernest Rutherford* (1871 - 1937) propuso un modelo atómico tipo modelo planetario, donde el lugar del Sol lo ocupa el núcleo y las partículas de carga negativa, los electrones, ocupan grandes órbitas tipo planetarias. La atracción eléctrica posee la misma forma matemática que la gravitacional, solo que en el

[1] Las partículas alfa son núcleos de helio.

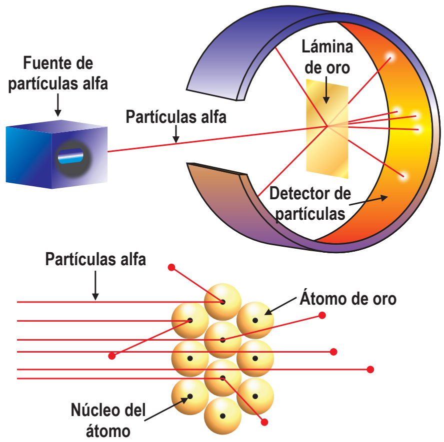


Figura C.5: Experimentos de dispersión de Geiger y Mardsen. Las trayectorias seguidas por las partículas alfa de baja energía dependerá de la estructura atómica. Las posiciones de las partículas detectadas no eran consistentes con el modelo atómico de Thomson. La interpretación es que el átomo posee su masa concentrada en una pequeña región, el núcleo atómico.

caso gravitacional es la masa la que genera la interacción, siendo en el caso eléctrico la carga.

Rápidamente se demostró que el modelo de Rutherford no era consistente con la física, pues las leyes de la electrodinámica predicen que *una partícula con carga que se mueve aceleradamente* (sometida a una fuerza neta), *debe irradiar ondas electromagnéticas*, perdiendo así energía. Por lo que un electrón orbitando en torno al núcleo emitirá ondas electromagnéticas. Al perder energía, sigue una trayectoria espiral, precipitándose al núcleo en unos 10^{-8} segundos, por lo que si esto fuese así, los átomos no deberían existir, lo que evidentemente no ocurre.

Estudiando las descargas eléctricas en tubos que contenían gases, se descubrió que cada gas producía un patrón específico y único de líneas brillantes u oscuras denominadas *líneas espectrales* (figura C.6). A modo de ejemplo, unas líneas que nunca habían sido observadas en el laboratorio fueron descubiertas en los espectros del Sol, y se interpretó como un nuevo elemento (ver capítulo 4, sección 1.2). A este nuevo gas se le denominó con el nombre griego del Sol: helio.

Un profesor suizo de matemáticas, *Johann Balmer* (1825 - 1898) encontró la relación matemática de las cuatro primeras líneas del espectro del hidrógeno:

$$\lambda_{linea} = \frac{(364{,}4)\, n^2}{n^2 - 4}$$

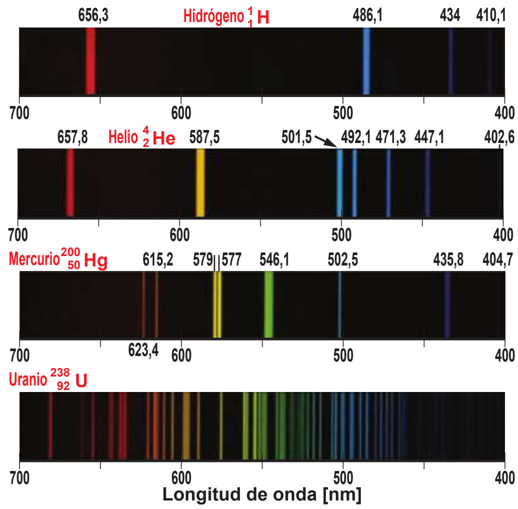


Figura C.6: Espectros visibles de distintos elementos: hidrógeno (arriba), helio, mercurio y uranio.

donde λ_{linea} es la longitud de onda de las líneas, n es un número entero mayor que dos, es decir, con valores 3, 4, 5, 6, etc.

Niels Bohr (1885 - 1962) estudiando el problema del átomo logra interpretar estas líneas como absorción de fotones que producen "saltos" de electrones en las órbitas, explicando así la absorción de ciertas frecuencias, generalizando la ecuación de Balmer al reemplazar en el denominador el número 4 por m^2, donde m también tomaba valores enteros.

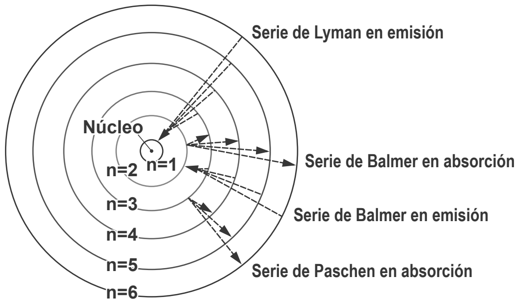


Figura C.7: Las transiciones electrónicas entre órbitas permiten explicar los espectros de los átomos, en particular el del átomo de hidrógeno.

En 1913 Bohr modificó el modelo atómico de Rutherford, suponiendo que los electrones obedecen a unas reglas diferentes de las que vienen dadas por las leyes de Newton y Maxwell, existiendo ciertas órbitas "*permitidas*" en las cuales el electrón no emite radiación. En estas órbitas se cumple la relación $2\pi r = n\lambda$, donde r es el radio de la órbita y n es un número natural, esto lleva a que la energía no puede tomar cualquier valor, sino que solo ciertos valores discretos (este es probablemente el resultado más importante de todos, *la energía está cuantizada*). En cualquier otra órbita los electrones irradiarían. Entonces los espectros corresponderían a absorción o emisión de fotones en transiciones electrónicas, es decir, cuando un electrón cambia de una órbita permitida a otra absorbe o emite un fotón cuya energía corresponde a la diferencia de energía de los niveles atómicos.

C.2.2. Ondas de materia

La idea de que la luz tuviera un comportamiento dual (ondas y fotones) inspiró a que *Louis-Victor de Broglie* (1892 - 1987) postulara en su tesis doctoral en 1924 la idea que toda la materia, incluso aquella que normalmente consideramos como partículas (como los electrones) deberían mostrar comportamiento ondulatorio. La longitud de onda de la *onda de materia* estaría dada por la relación:

$$\lambda_{dB} = \frac{h}{p}$$

donde h es la constante de Planck y $p = mv$ es el producto de la masa de la partícula por su velocidad y se denomina *momentum lineal*. El pequeño valor de la constante de Planck ($6{,}62 \cdot 10^{-34}$ [J s]) hace que las ondas asociadas a objetos de la vida cotidiana sean inobservables.

En 1927 *Clinton Davisson* (1881 - 1958) y *Lester Germer* (1881 - 1958) e independientemente *George Thomson* (1892 - 1975) (hijo de J. Thomson), realizaron experimentos en los cuales se observan patrones de difracción en experimentos con electrones (algo similar al patrón de la doble rendija de Young), demostrando de manera concluyente la naturaleza ondulatoria del electrón. En 1929 de Broglie obtuvo el premio Nobel, y en 1937 Davisson y Thomson también obtienen el premio Nobel.

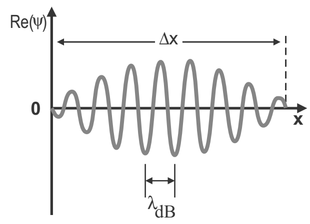


Figura C.8: Función de onda de un paquete de ondas (onda con principio y fin) que representa a una partícula libre.

La dualidad onda-partícula establece una relación entre las variables "posición y velocidad del centro de masa" de la partícula, y "longitud de onda, período y amplitud" de las ondas. A modo de ejemplo consideremos una pelota de tenis que se mueve a unos 200 [km/h], se obtienen entonces longitudes de onda del orden de 10^{-38} [m], tan pequeñas que resultan completamente irrelevantes para describir su movimiento, en cambio consideremos una velocidad típica para electrones en el ámbito atómico ($\sim 10^7$ [m/s]), esto nos da una longitud de onda asociada del orden del diámetro de un átomo, de esta forma observamos que en el ámbito atómico

el dualismo es relevante. Dada la naturaleza ondulatoria, podemos interpretar el experimento de la doble rendija con electrones como si éstos *pudiesen pasar por dos orificios simultáneamente*.

Adicionalmente debemos considerar el *principio de incerteza o incertidumbre de Heisenberg* que afirma la imposibilidad de determinar la posición y el momentum (o la velocidad) de forma simultánea con una precisión infinita, de esta forma la energía más baja del electrón no puede ser cero ya que se encontraría en reposo y debido al principio de Heisenberg solo podríamos saber una cierta zona donde se encuentra el electrón, pero no el lugar exacto.

En 1925, inspirado en parte por el trabajo de de Broglie, *Erwin Schrödinger* (1887 - 1961) y *Werner Heisenberg* (1901 - 1976) postulan de forma diferente pero equivalente una nueva teoría, la teoría de los cuantos. Dos décadas después, *Richard Feynman* (1918 - 1988) postula una tercera forma equivalente. Aunque todas ellas son aparentemente inconexas, son casos particulares de una teoría más general, la teoría cuántica de Dirac.

En mecánica cuántica se habla de la *probabilidad* de encontrar una partícula en un cierto estado, esta probabilidad está asociada al cuadrado de la *función de onda*, que es la función matemática que describe la onda de materia asociada a una partícula. Aunque los principios de la mecánica cuántica nos parezcan extraños y sean ajenos a nuestra vida cotidiana, tienen múltiples aplicaciones, por ejemplo los transistores y los circuitos integrados no serían posibles sin el conocimiento de esta teoría.

C.2.3. Modelo cuántico del átomo

El modelo cuántico del átomo debe tener en consideración la naturaleza ondulatoria del electrón.

Consideraremos el átomo más sencillo, el átomo de hidrógeno. El análisis formal del problema comienza a partir de la ecuación de movimiento de las ondas de materia, la ecuación de Schrödinger y del conocimiento de la energía potencial (debido a la interacción eléctrica entre el núcleo y el electrón). La forma funcional de esta energía es conocida y solo depende de la distancia del electrón al núcleo.

C.2.3.1. Orbitales atómicos

La solución de la ecuación de Schrödinger nos dará como resultado la función de onda (y con ello el conocimiento de la distribución de probabilidad de encontrar al electrón) y los valores de la energía.

Dado que la energía potencial solo depende del radio, la función de onda se puede escribir como el producto de dos componentes, una que solo depende del radio y otra que solo depende de los ángulos (son dos ángulos, además del radio, los que describirían la posición del electrón). Entonces la ecuación de Schrödinger se convierte en dos ecuaciones, una denominada ecuación radial y otra ecuación angular.

La solución de la ecuación radial arroja que la energía del sistema no puede tomar cualquier valor. La energía toma un conjunto de valores posibles denominadas *autoenergías* y que dependen de un número natural n denominado *número cuántico principal*. Por lo que para cada valor de n tenemos un único valor de energía, que son los mismos obtenidos en el modelo de Bohr.

La teoría cuántica permite dar una interpretación a la condición de órbitas permitidas del modelo de Bohr, éstas corresponden a la condición de ondas electrónicas estacionarias (ver Apéndice B). La condición para que se forme una onda estacionaria en un círculo de radio r es que su perímetro sea igual a un número entero de longitudes de onda:

$$2\pi r = n\lambda$$

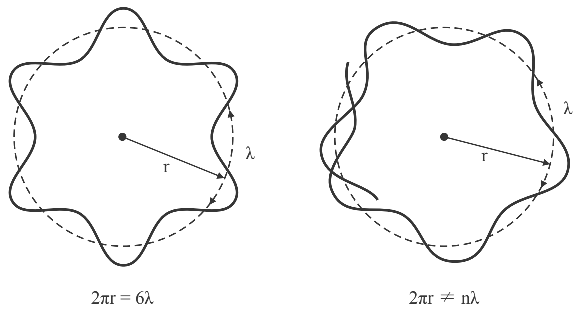


Figura C.9: Las órbitas permitidas son aquellas en que se tienen un número entero de longitudes de ondas electrónicas estacionarias.

El problema es equivalente al de los modos de vibración de una cuerda con los extremos fijos (ver Apéndice B). Así solo algunas longitudes de onda son permitidas y por ende ciertos valores de energía.

La solución de la ecuación angular introduce dos números enteros m y ℓ, denominados número cuántico magnético y número cuántico de momento angular o azimutal respectivamente.

El significado físico que tienen los números ℓ y m está asociado a que no solo la energía está cuantizada, también lo está la denominada cantidad de movimiento angular (*momentum angular*), cuya magnitud (módulo) está cuantizado y su valor está determinado por el número cuántico ℓ, pero además su proyección del vector sobre uno de los ejes también está cuantizada, y su valor está determinado por el número cuántico m.

Estos números cuánticos no son independientes entre sí, sino que cumplen lo siguiente:

- ℓ puede tomar valores entre 0 y $n - 1$.
- m solo puede tomar valores entre $-\ell$ y ℓ.

Por ejemplo para $n = 1 \Rightarrow \ell = 0 \Rightarrow m = 0$. Pero para $n = 2$, ℓ puede ser $\ell = 0 \Rightarrow m = 0$ o puede ser $\ell = 1$, por lo que m puede ser -1, 0 o 1.

La función de onda resultante para un estado monoelectrónico será el producto de la función radial y de la función angular, y para valores definidos de los tres números cuánticos reciben el nombre de *orbital*.

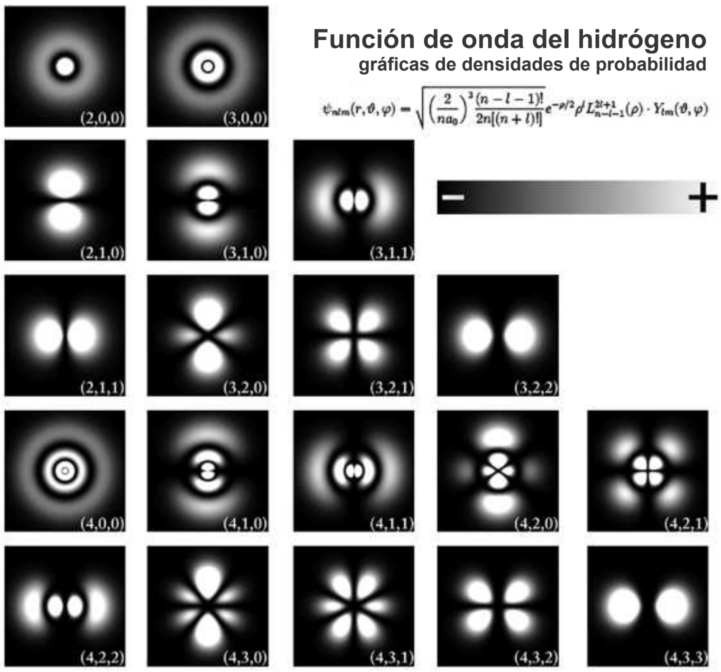


Figura C.10: Gráficas de la densidad de probabilidad electrónicas de algunos orbitales atómicos del hidrógeno para distintos valores de (n, ℓ, m). Fuente: http://ius.edu/physics/~kyle/physlets/quantum/hydrogen.html

El número de electrones que tiene un átomo neutro está dado por el *número atómico* (Z), es decir, por el número de protones del núcleo. La distribución de los electrones en los distintos niveles es de $2n^2$, donde n es el número cuántico

principal u orbital, así pueden haber 2, 8, 18, 32, entre el primer y el cuarto nivel, a su vez cada nivel se subdivide en subniveles que por razones históricas se denominan según la notación espectroscópica como s al subnivel $\ell = 0$, p al subnivel $\ell = 1$, d al subnivel $\ell = 2$, f al subnivel $\ell = 3$, y así sucesivamente continuando en orden alfabético para los siguientes subniveles. En los subniveles s, p, d, f, pueden ubicarse 2, 6, 10, 14 electrones respectivamente. Cada subnivel se denomina por el número cuántico n y la letra minúscula del respectivo subnivel (s, p, d, f).

El nivel de energía de un electrón es proporcional a su distancia respecto al núcleo, así los niveles de energía de los electrones en las capas más alejadas del núcleo son mayores que los que se encuentran en las capas más cercanas a él. Los electrones que se hallan en la capa más externa se denominan *electrones de valencia*. Si a un material se le aplica energía externa en forma de calor, luz o energía eléctrica sus electrones ganan energía haciendo que se muevan a un nivel superior de energía. Un átomo que ha ganado energía se dice que está en un *estado excitado*.

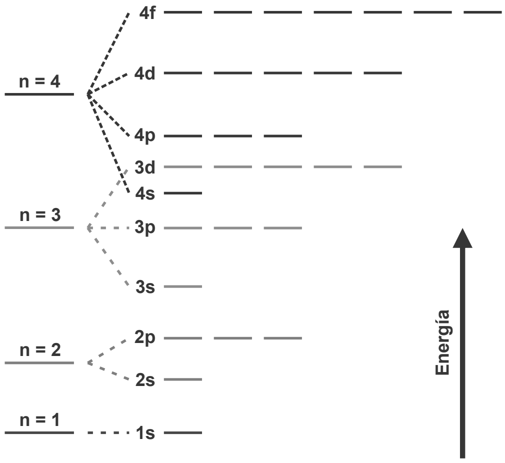


Figura C.11: Cada electrón ocupa un orbital atómico dado por una combinación única de números cuánticos los cuales a su vez determinan el nivel de energía.

Cuando un electrón se ha movido hacia la capa exterior de su átomo, la atracción producida por los protones del núcleo disminuye. Si se aplica entonces suficiente energía al átomo, algunos de sus electrones situados en la capa de valencia lo abandonarán. Esto se puede lograr a través de procesos como:

- Fricción: al frotar dos superficies (por ejemplo los autos con el roce del aire).
- Presión: el efecto piezoeléctrico (usado en los micrófonos).
- Temperatura: emisión termoiónica (usada en válvulas de vacío como las antiguas pantallas de televisión).
- Acción química: rompimiento de enlaces (usado en las baterías).
- Radiación electromagnética: efecto fotoeléctrico (usado en paneles solares como el de algunas calculadoras).

Si la capa exterior de un átomo está llena, se dice que el elemento es *inerte*. Si la capa externa no está llena de electrones, puede adquirirlos o cederlos; cuando ello ocurre, los átomos adquieren carga negativa o positiva, a este proceso se le denomina *ionización*. Si un átomo pierde uno o más electrones de su capa exterior, los protones exceden a los electrones y el átomo adquiere carga eléctrica neta positiva. En esta condición, el átomo se llama *ion positivo*. Si un átomo adquiere electrones, su carga eléctrica neta se vuelve negativa, y se dice que el átomo es un *ion negativo*.

Sin embargo, aún falta un ingrediente que se debe agregar a la teoría atómica proveniente de la ecuación de Schrödinger (aunque sale de forma natural de la teoría de Dirac).

En 1922 *Otto Stern* (1888 - 1969) y *Walther Gerlach* (1889 - 1979), realizaron experimentos donde se enviaba un haz de partículas de plata a través de un campo magnético inhomogéneo, observándose que el haz es desviado en dos direcciones opuestas, impactando una placa fotográfica en dos regiones. Sin embargo, la teoría clásica predecía que algunas partículas serían desviadas fuertemente y otras más débilmente por lo que las partículas serían desviadas en ambas direcciones cubriendo una amplia región. El resultado del experimento lleva a la conclusión de que existe otra componente de momentum angular distinta de la orbital que puede tomar solo valores semienteros. A esta componente de momentum angular no orbital se le denomina "*espín*" (del inglés *to spin*; girar) y corresponde a una cantidad de movimiento angular "intrínseca" que no tiene un símil en el mundo clásico. La forma más sencilla de interpretar la existencia de una cantidad de movimiento angular que no sea orbital es pensando en los planetas que además de tener un movimiento de rotación en torno del Sol tienen otro sobre su propio eje, pero *¡cuidado!*, las partículas subatómicas ya no son solo partículas, también son ondas, por lo que un modelo de esfera girando sobre su propio eje no tiene ningún sentido, es más, se puede demostrar que una partícula con carga como un electrón no puede existir debido a la repulsión que produciría una parte de la pelotita con la otra parte. Por lo que aunque en muchos textos y conferencias se diga que el espín es el giro de la partícula sobre su propio eje, es imposible que esto sea así pues las partículas como las concebimos en la vida cotidiana no existen en el mundo microscópico.

Entonces habrá que agregar un cuarto número cuántico, el número cuántico de espín (s) que puede tomar valores enteros o semienteros. Para el caso de los constituyentes del átomo estos pueden tomar valores de $+\frac{1}{2}$ y $-\frac{1}{2}$.

Ahora que hemos construído un modelo atómico cabe preguntar ¿por qué los electrones no se pueden ubicar todos en un mismo orbital?

Primero debemos decir que dependiendo si el espín de una partícula es entero o semientero se clasifican en bosones y fermiones repectivamente. Los electrones son fermiones, y los fermiones obedecen una regla conocida como "*principio de exclusión*" que fue enunciado por Wolfgang Pauli (1900 - 1958) en 1925 el cual dice que no puede haber más de un fermión en un mismo estado cuántico, es decir, no puede haber dos o más fermiones del mismo tipo con todos sus números cuánticos idénticos. Aplicando esto a los electrones de un átomo, no pueden haber dos electrones con los cuatro números cuánticos iguales, por lo que por ejemplo para $n = 1$ se tiene que además $\ell = 0$ y $m = 0$, por lo que al haber solo dos posibilidades para el número cuántico de espín $\left(s = \pm\frac{1}{2}\right)$ solo pueden haber hasta dos electrones en el primer nivel. De esta forma los electrones están "obligados" a ir ocupando diferentes niveles y subniveles.

C.2.3.2. El núcleo atómico

En 1932 Sir *James Chadwick* (1891 - 1974) descubrió que el núcleo posee partículas sin carga eléctrica, que se denominaron *neutrones*.

El núcleo atómico está compuesto de partículas llamadas *nucleones* que se dividen en protones con carga positiva y neutrones que poseen carga nula.

Existen átomos con el mismo número de protones en su núcleo, pero con diferente número de neutrones, es decir, difieren en la cantidad total de nucleones o su *número másico* (A). Los átomos que tienen el mismo número atómico, pero diferente número másico se denominan *isótopos*.

En la usual notación de los elementos, el número atómico se representa con un subíndice en el lado izquierdo del símbolo químico y el número másico se representa con un superíndice en el lado izquierdo del símbolo químico. Así $^{14}_{6}$C representa al carbono que posee 6 protones y 8 neutrones ($A = 14$). A veces se suprime el valor de Z porque ya está implícito en el símbolo químico. Los físicos y astrofísicos, suelen escribir el valor de A en el lado derecho en vez del izquierdo, por lo que el carbono-14 se escribe $_6C^{14}$ o más abreviadamente C^{14}, y ésta es la notación usada en este texto.

¿Qué hace posible que partículas que se repelen entre sí se agrupen junto a partículas neutras para formar un núcleo atómico?

La respuesta es que debe existir una fuerza que actúa sobre los nucleones y que es mayor que la fuerza de repulsión eléctrica entre protones y que actúa indistintamente sobre protones y neutrones, esto es, independientemente del valor de la carga eléctrica, pero además esta fuerza no debe ser de largo alcance, ya que si lo fuera, existirían átomos de grandes números atómicos y grandes números másicos que no se observan en la naturaleza, además no permitiría la existencia de moléculas, ya que los núcleos de los átomos que conforman las moléculas tenderían a agruparse en un único núcleo.

La fuerza nuclear debe ser capaz de explicar:

1. La existencia de isótopos
2. La radiactividad (inestabilidad de algunos núcleos)
3. Procesos nucleares de fisión y fusión

En 1964 *Murray Gell-Mann* (1929 -) y *George Zweig* (1937 -) sugirieron que protones y neutrones podrían ser explicados como una combinación de tres partículas fundamentales llamadas *quarks*. Se conocen seis tipos de quarks llamados "*flavors*" (sabores): *up* (arriba), *down* (abajo), *strange* (extraño), *charmed* (encanto), *bottom* (fondo) y *top* (cima). La carga eléctrica de estas partículas es de $\frac{2}{3}$ y $-\frac{1}{3}$ la carga del protón, esto ha sido algo totalmente nuevo, ya que siempre se consideró la carga de $+1$ y -1 veces la carga del protón como fundamentales.

Al principio los quarks fueron considerados como una solución matemática, pero los experimentos han corroborado el modelo de los quarks.

Los quarks no se encuentran como partículas independientes ya que se agrupan para formar otras partículas llamadas *hadrones*, de los cuales existen dos clases: los *bariones* formados de tres quarks y los *mesones* formados de un par quark-antiquark. El protón esta compuesto por el triplete *up-up-down* y el neutrón por el triplete *up-down-down*. Pueden ocurrir otras combinaciones de quarks pero estas son muy inestables y decaen rápidamente en protones y neutrones.

La *interacción fuerte* es la que mantiene ligados a los quarks en los nucleones y el residuo de esta interacción es la fuerza que mantiene unidos a los neutrones y protones como si fueran moléculas de quarks. Esta interacción residual es la denominada fuerza nuclear y se caracteriza por:

1. Ser de corto alcance ($\sim 10^{-15}$ [m] $\equiv 1$ [fm])
2. A pequeñas distancias es atractiva y de magnitud mayor que la interacción eléctrica.
3. Si las distancias son más pequeñas aún, se torna una fuerza repulsiva.

4. Es igual entre protón-protón, protón-neutrón y neutrón-neutrón.

De esta forma los nucleones están confinados al interior del núcleo por la fuerza nuclear, si el núcleo es pequeño la fuerza nuclear será mayor que la repulsión eléctrica y por el contrario si el núcleo es muy grande la fuerza nuclear es más débil y la repulsión eléctrica se vuelve más importante, haciendo que estos núcleos sean inestables.

En general, para que un sistema esté ligado, la energía del conjunto debe ser menor que la energía de las componentes separadas. Entonces para formar un deuterón (protón-neutrón) se debe liberar energía, y esta ocurre a través de un fotón gamma, cuya energía corresponde a la energía de ligadura de dicho núcleo.

Tal como los electrones en el átomo, los nucleones tienen niveles de energía discretos ordenados en capas (son fermiones). Al igual de lo que ocurre con átomos, las capas llenas son más estables. Los núcleos serán más estables si la energía de ligadura es mayor.

C.2.4. Decaimiento radiactivo

En 1896 *Henri Becquerel* (1852 - 1908) descubrió que una placa fotográfica dejada en las cercanías del elemento químico uranio, producía imágenes en ausencia de luz. Becquerel interpretó que ciertos elementos producían radiación de alta energía a los que posteriormente *Marie Curie* (1867 - 1934) denominó *radiactivos*.

La *radiactividad* o *radioactividad* es un fenómeno natural, por el cual algunos elementos químicos, los radiactivos, emiten radiaciones que tienen la propiedad no solo de impresionar placas fotográficas, sino también ionizar gases, producir fluorescencia, atravesar cuerpos opacos a la luz ordinaria, etc. Debido a esa capacidad se las suele denominar *radiaciones ionizantes*.

Las radiaciones emitidas pueden ser electromagnéticas en forma de rayos X o rayos gamma, o bien partículas, como pueden ser núcleos de helio, electrones o positrones, protones u otras. Se clasifican en tres tipos diferentes:

- **Radiación alfa:** Son flujos de partículas cargadas positivamente compuestas por dos neutrones y dos protones, es decir, núcleos de helio. Debido a su carga eléctrica sus trayectorias son desviadas por campos eléctricos y magnéticos. Aunque son poco penetrantes, son muy ionizantes y energéticas.

- **Radiación beta:** Son flujos de electrones (beta negativas) o positrones (beta positivas) resultantes del decaimiento de neutrones o protones del núcleo. Debido a su carga eléctrica, sus trayectorias son desviadas por campos eléctricos y magnéticos. Son muy penetrantes aunque su poder de ionización no es tan elevado como el de las partículas alfa. Si el núcleo atómico expulsa una partícula beta, aumenta o disminuye su número atómico en una unidad, debido al protón ganado o perdido.

- **Radiación gamma:** Son ondas electromagnéticas. Es el tipo más penetrante de radiación. Al ser ondas electromagnéticas de longitud de onda corta, tienen mayor penetración y se necesitan capas muy gruesas de plomo u hormigón para detenerlas.

La radiactividad tiene muchas utilidades, las más importantes son las dataciones donde son usados como relojes de tiempos largos. En medicina se usan como trazadores en algunos procesos biológicos y para determinar las velocidades de ciertas reacciones químicas. Por

otra parte es importante decir que la exposición de organismos vivos a la radiación de alta energía puede producir cáncer.

Algunos isótopos son *estables* y otros *inestables*, estos últimos emiten radiación cuando cambian de la forma inestable a una más estable. En realidad, también los isótopos estables son inestables, pero tienen un tiempo de decaimiento extremadamente largo, aún comparado con la edad de la Tierra.

La radiactividad es una propiedad de los isótopos inestables, al emitir neutrones, protones o partículas más pesadas y luego de reiterados *decaimientos*, un isótopo pesado puede terminar convirtiéndose en uno mucho más ligero, tal como el uranio que con el transcurrir de los siglos acaba convirtiéndose en plomo.

En el contexto de la física nuclear, para que se produzca un decaimiento la energía del núcleo inicial debe ser mayor que la de los productos, entonces el sistema prefiere decaer a la energía menor.

En el caso del decaimiento γ ocurre debido a una transición nuclear, en la cual un núcleo excitado decae a un estado de energía menor, emitiendo un fotón (que suele ser gamma debido a las diferencias de energía involucradas). Esto es equivalente a la emisión de radiación en átomos o moléculas producto de las transiciones electrónicas. El núcleo no cambia ni su número atómico ni su número másico, solo decae de un estado excitado a uno de menor energía.

En el caso del decaimiento β un neutrón se convirtió en protón, por lo que se mantiene el número de nucleones, pero aumenta el número atómico en una unidad. En el proceso se produce un electrón y un antineutrino. En los decaimientos siempre se producen neutrinos en par con positrones (e^+) y antineutrinos en par con electrones (e^-).

En el caso del decaimiento β^+ (beta inverso) un protón se convirtió en neutrón, por lo que se mantiene el número de nucleones, pero disminuye el número atómico en una unidad. En el proceso se produce un positrón y un neutrino.

Los decaimientos β y β^+ para núcleos pequeños ($A \leq 50$) ocurren debido a que el estado de menor energía ocurre cuando $Z \approx \frac{A}{2}$, esto es, cuando el número de neutrones N es $N \approx Z$. Por lo que un nucleón (protones o neutrones) cuyo número es mayor a la otra especie, no puede bajar a un nivel de menor energía manteniendo su identidad, pues los niveles inferiores están ocupados, sin embargo, los niveles inferiores del nucleón de la otra especie están disponibles, por lo que transiciona al nivel inferior pero del otro tipo de nucleón. Veamos como es esto con un ejemplo: supongamos que tenemos tres núcleos $^{12}_{5}B$, $^{12}_{6}C$ y $^{12}_{7}N$ (figura C.12). Cada tipo de nucleón llena los distintos niveles de acuerdo al principio de exclusión de pauli, pero solo el $^{12}_{6}C$ tiene la configuración de mínima energía. Dado que las configuraciones del $^{12}_{5}B$ y del $^{12}_{7}N$ son de mayor energía que la configuración del $^{12}_{6}C$, éstos dos pueden decaer al $^{12}_{6}C$ mediante un decaimiento β y β^+ respectivamente (figura C.12).

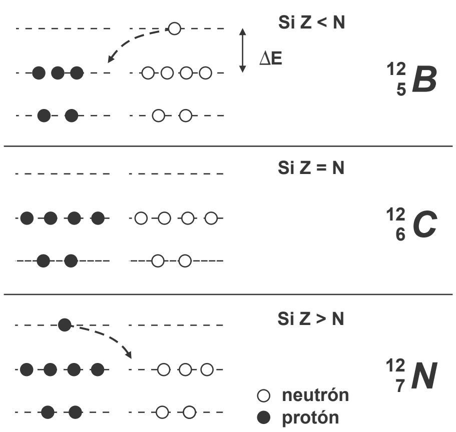


Figura C.12: Configuración de energía para los últimos niveles de tres núcleos atómicos $^{12}_{5}B$, $^{12}_{6}C$ y $^{12}_{7}N$. La configuración de menos energía es la del núcleo de $^{12}_{6}C$.

Para el caso de núcleos pesados, la mayor estabilidad no se logra cuando $Z \approx \frac{A}{2}$ sino que cuando hay más neutrones que protones. Si hay muchos protones la repulsión eléctrica supera a la atracción nuclear (la energía del sistema sube) y dado que la fuerza nuclear es de

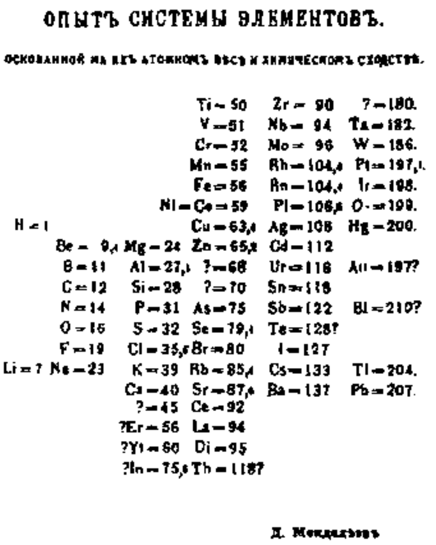
corto alcance, los nucleones se enlazan solo con los vecinos por lo que para núcleos grandes la energía de enlace disminuye. Si la energía del núcleo es mayor que la energía del núcleo separado entonces ocurrirá un decaimiento y el núcleo se fragmentará. En general ocurre que si $A \geq 142$ ocurrirá decaimiento α, o se fragmenta en dos o más trozos pequeños, lo que se denomina fisión espontánea. Los núcleos que resultan de la fisión de un mismo tipo de núcleo, no siempre son los mismos. Normalmente resultan emitidos varios neutrones libres. Sin embargo, la energía liberada en la reacción es menor que la energía de la barrera de energía potencial que los mantiene confinados en el núcleo, pese a ello, debido a que las partículas encerradas desde el punto de vista ondulatorio son ondas, pueden atravesar la barrera con una cierta probabilidad y salir del núcleo. Esto último es conocido como *efecto túnel*.

C.3. Organización de la materia

La materia está compuesta de elementos, cuya unidad fundamental son los átomos, éstos se combinan para formar estructuras más complejas llamados compuestos cuya unidad fundamental son las *moléculas*.

C.3.1. La tabla periódica

El químico ruso *Dmitri Mendeléyev* (1834 - 1907) observó que las propiedades de los 63 elementos conocidos hasta entonces se repetía de forma periódica, construyó entonces una guía para ayudar a sus estudiantes que agrupaba ciertas familias que poseían propiedades químicas similares pero masas crecientes a intervalos regulares. Así por ejemplo los gases nobles (no conocidos por Mendeléyev) como el helio ($Z = 2$), seguido por el neón ($Z = 10$) y luego por el argón ($Z = 18$) se encuentran separados por intervalos de 8 protones. Esto, como observó Mendeléyev, predecía la existencia de elementos aún no conocidos, por ello dejó espacios vacíos (ver figura C.13) para que fuesen ocupados por estos nuevos elementos que progresivamente fueron completados al ser descubiertos.



ОПЫТЪ СИСТЕМЫ ЭЛЕМЕНТОВЪ.

основанной на ихъ атомномъ вѣсѣ и химическомъ сходствѣ.

			Ti=50	Zr=90	?=180.
			V=51	Nb=94	Ta=182.
			Cr=52	Mo=96	W=186.
			Mn=55	Rh=104,4	Pt=197,4.
			Fe=56	Ru=104,4	Ir=198.
			Ni=Co=59	Pl=106,6	Os=199.
H=1			Cu=63,4	Ag=108	Hg=200.
	Be=9,4	Mg=24	Zn=65,2	Cd=112	
	B=11	Al=27,4	?=68	Ur=116	Au=197?
	C=12	Si=28	?=70	Sn=118	
	N=14	P=31	As=75	Sb=122	Bi=210?
	O=16	S=32	Se=79,4	Te=128?	
	F=19	Cl=35,5	Br=80	I=127	
Li=7	Na=23	K=39	Rb=85,4	Cs=133	Tl=204.
		Ca=40	Sr=87,6	Ba=137	Pb=207.
		?=45	Ce=92		
		?Er=56	La=94		
		?Yt=60	Di=95		
		?In=75,6	Th=118?		

Д. Менделѣевъ

Figura C.13: Tabla periódica de Mendeléyev. Observe que hay elementos indicados con un símbolo ?, desconocidos en la época.

De acuerdo a la teoría cuántica del átomo, los orbitales atómicos están descritos por tres números cuánticos:

- El número cuántico principal (n) que nos indica el nivel.
- El número cuántico azimutal (ℓ) cuyos valores se encuentran entre 0 y $n - 1$ los que hemos llamado s, p, d, f, y su valor está directamente relacionado con la forma del orbital.
- El número cuántico magnético (m_ℓ) cuyos valores se encuentran entre $-\ell$ y $+\ell$, y su valor está relacionado con la orientación espacial de los orbitales.

El estado de los electrones está dado por su *energía*, su cantidad de movimiento o *momentum* y su cantidad de movimiento angular intrínseco o *espín*. Los electrones pueden tener valores del número cuántico de espín (S) $+\frac{1}{2}$ o $-\frac{1}{2}$.

La periodicidad de la tabla periódica no pudo ser entendida hasta la llegada del *principio de exclusión* enunciado por Pauli que aplicado a los electrones del átomo, implica que estos no pueden tener los cuatro números cuánticos iguales. Este conocimiento permitió una completa compresión de la tabla periódica dando paso a la moderna tabla periódica de los elementos (figura C.14).

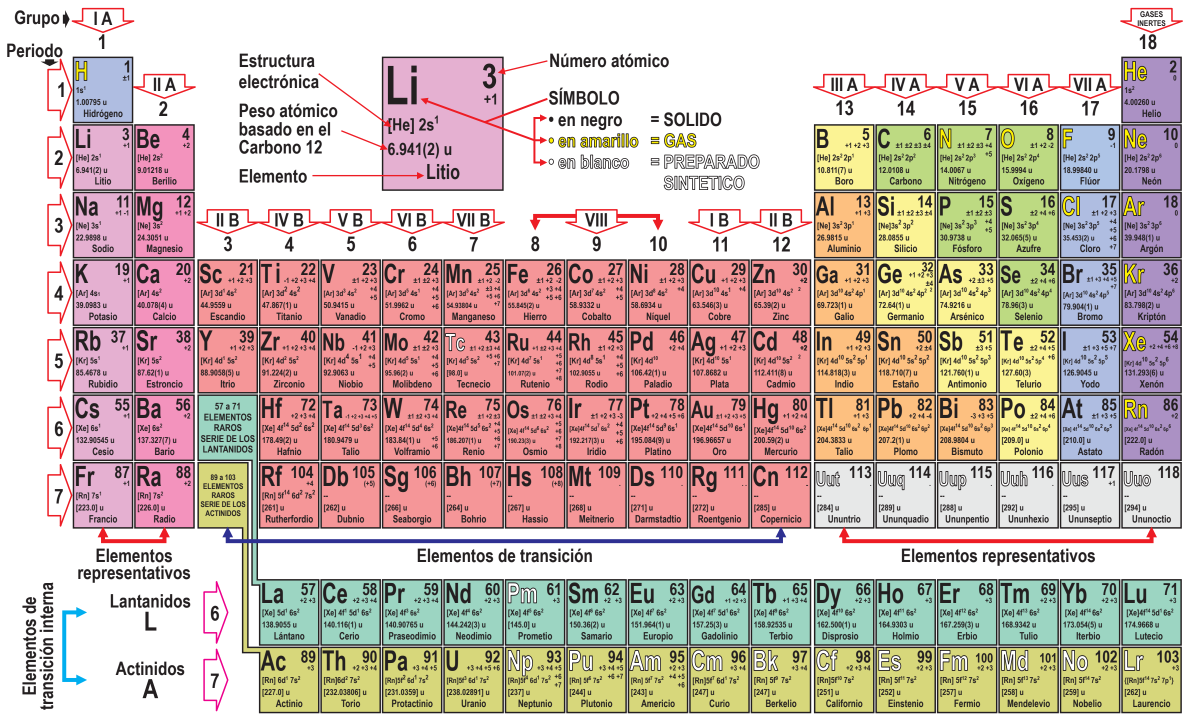


Figura C.14: La moderna tabla periódica de los elementos.

A las columnas verticales de la moderna tabla periódica de los elementos se les denomina *grupos*. Todos los elementos que pertenecen a un grupo tienen la misma *valencia*, y por ello, tienen características o propiedades similares entre si. Por ejemplo, los elementos en el grupo IA tienen valencia 1, es decir, un electrón en su último orbital y todos tienden a perder ese electrón al enlazarse como iones positivos. Los elementos en el último grupo de la derecha son los gases nobles, los cuales tienen su ultimo orbital lleno y por ello son todos extremadamente no-reactivos.

Los grupos de la tabla periódica, numerados de izquierda a derecha son:

- Grupo 1 (IA): los metales alcalinos
- Grupo 2 (IIA): los metales alcalino-térreos
- Grupo 3 al Grupo 12: los metales de transición y metales nobles.
- Grupo 13 (IIIA): el grupo del boro
- Grupo 14 (IVA): el grupo del carbono
- Grupo 15 (VA): el grupo del nitrógeno
- Grupo 16 (VIA): los calcíagenos o anfígenos
- Grupo 17 (VIIA): los halógenos
- Grupo 18 (Grupo 0): los gases nobles

Las filas horizontales de la tabla periódica son llamadas *períodos*. A diferencia del caso de los grupos, los elementos que componen una misma fila tienen propiedades diferentes pero masas similares, y todos los elementos de un período tienen el mismo número de orbitales. Siguiendo esa norma, cada elemento se ubica de acuerdo a su configuración electrónica. El primer período solo tiene dos miembros, hidrógeno y helio y ambos tienen (en su estado fundamental) solo el orbital $1s$. La tabla periódica tiene siete períodos.

La distribución de los elementos en la tabla periódica, hace que resalten sus propiedades y características. Por ejemplo, al ganar electrones los elementos aumentan en *electronegatividad*[2] y lo hacen los elementos que están a la derecha y hacia arriba de la tabla periódica. Así el flúor es el elemento más electronegativo de la tabla periódica. La reactividad de los elementos aumenta al aumentar los períodos, haciendo que el helio sea el elemento más inerte de la tabla periódica.

Las diferencias en energía de ionización también se pueden visualizar en la tabla periódica, aumentando con incrementos en el número atómico de los elementos. Así los elementos del grupo 1 tienen la energía de ionización más baja y los gases nobles, la más alta.

Los elementos del grupo 1 son los más metálicos de la tabla periódica disminuyendo esta propiedad al aumentar el grupo hacia la derecha de la tabla.

C.3.2. Moléculas y enlaces

Se denomina *molécula* a un estado ligado por enlaces electrónicos de más de un núcleo. Resolver el problema exacto de una molécula involucra resolver la ecuación de Schrödinger con todas las interacciones. Como hay más de un núcleo ahora el problema se vuelve muy difícil de resolver matemáticamente.

La molécula más simple es la de H_2^+ que consta de dos protones y un electrón. En este caso, la función de onda puede tener dos formas, una es llamada la solución *simétrica* y la otra *antisimétrica*. En el caso simétrico hay una cierta probabilidad de que el electrón esté entre los dos núcleos y en el caso antisimétrico la probabilidad de encontrar al electrón entre los núcleos es nula. Por lo que solo la solución simétrica corresponde a un estado ligado, el electrón se ubica entre los núcleos atrayendo a ambos, permitiendo la formación de la molécula. Si el electrón no se ubica entre los núcleos entonces no hay una atracción neta entre los núcleos y no se forma la molécula. La siguiente molécula en complejidad es la de H_2 que consta de dos protones y dos electrones, la solución es similar a la de H_2^+ pero ahora en el caso simétrico hay dos electrones en vez de uno en la zona entre los núcleos.

Se denominan *orbitales moleculares* a aquellos constituidos por combinaciones lineales de orbitales atómicos que describen el estado de los electrones de una molécula. Y se cumple que:

- Existe el mismo número de orbitales moleculares que orbitales atómicos que se utilizan para su construcción.

- Los orbitales atómicos sólo se mezclan si lo permiten las reglas de simetría[3].

[2] La electronegatividad de un elemento es la capacidad que tiene un átomo de dicho elemento para atraer hacia sí los electrones, cuando forma parte de un compuesto.

[3] En realidad los orbitales que se transforman de acuerdo con diferentes representaciones irreducibles del grupo de simetría no se mezclan.

La combinación simétrica es llamada *orbital enlazante* (se encuentran en estado de atracción) y posee más baja energía que los orbitales originales, y la combinación antisimétrica es llamada *orbital antienlazante* y posee más alta energía que los orbitales originales (estado de repulsión). Cada orbital molecular puede albergar dos electrones.

Orbitales σ enlazantes: Combinación de orbitales atómicos s y p ($s-s$, $p-p$, $s-p$, $p-s$). Son enlaces simples y los electrones se distribuyen con geometría cilíndrica alrededor del eje de enlace.

Orbitales π enlazantes: Combinación de orbitales atómicos p perpendiculares al eje de enlace. Los electrones interaccionan fácilmente con el entorno. Se distribuyen como nubes electrónicas por encima y debajo del plano de enlace.

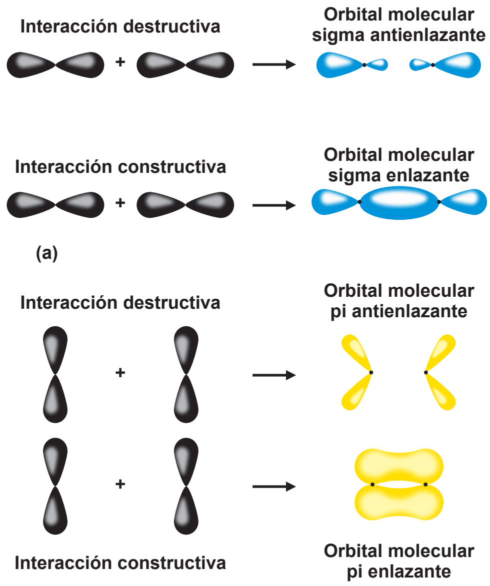


Figura C.15: Tipos de orbitales moleculares.

Orbitales σ^* antienlazantes: Versión de mayor energía (excitada) de los enlazantes.

Orbitales π^* antienlazantes: Orbitales π de alta energía.

Dado que los electrones en orbitales antienlazantes desestabilizan la molécula, a temperatura ambiente (y sin perturbar), los electrones se organizan en orbitales de menor energía, es decir, enlazantes.

Moléculas diatómicas de dos átomos idénticos como H_2, H_2^+, Cl_2, N_2, etc. tienen funciones de onda simétricas y la "nube electrónica" se ubica en el medio de los núcleos y los átomos comparten uno o más pares electrónicos. Este tipo de enlaces se denomina *covalente*.

Cuando se trata de moléculas de átomos distintos como CO_2, CO, etc. La función de onda ya no es más simétrica y los electrones se ubican preferentemente más cerca de uno de los núcleos que del otro: un electrón abandona el átomo menos electronegativo y pasa a formar parte de la nube electrónica del más electronegativo. El caso extremo es aquel en el que el electrón queda ligado a un solo núcleo. El sistema total es neutro pero esta polarizado con una zona de carga positiva y otra de carga negativa. Este tipo de enlace se denomina *enlace iónico*. El ejemplo típico de molécula unida a través de enlace iónico es el NaCl que corresponde a la sal común.

C.4. Bibliografía del capítulo

- *Física. Volumen I, Mecánica, Radiación y Calor*. R. Feynman, R. Leighton & M. Sands. *Addison Wesley Iberoamericana*. 1987.
- *El Universo Cuántico*. T. Hey & P. Walters. Alianza Editorial.

Apéndice D

Elementos de química orgánica y bioquímica

El estudio químico de la materia viva nos muestra que está compuesta por 28 elementos. Más del 99 % de la masa total corresponde a: carbono (C), hidrógeno (H), oxígeno (O), nitrógeno (N), azufre (S), fósforo (P), calcio (Ca), magnesio (Mg), potasio (K) y sodio (Na). El resto (menos del 1 %) también son muy importantes, entre otros: flúor (F), bromo (Br), yodo (I), arsénico (As), silicio (Si), hierro (Fe), zinc (Zn), cobre (Cu), manganeso (Mn). Éstos se combinan para formar moléculas entre otras; agua, sales minerales, monosacáridos, disacáridos, lípidos, aminoácidos y proteínas.

D.1. Hidrocarburos

El carbono es el elemento fundamental de la química orgánica; sus características particulares, que veremos a continuación, le permiten formar cerca de 10 millones de compuestos, y forma parte de todos los seres vivos conocidos. Aunque también el carbono forma compuestos inorgánicos.

El carbono es capaz de enlazarse con diversos átomos, incluyendo otros átomos de carbono, para formar un gran número de compuestos con la singular característica de formar enlaces múltiples por la presencia de orbitales híbridos[1], formados por combinaciones de orbitales atómicos. Las hibridaciones más comunes se producen entre orbitales s y orbitales p. Como en cada nivel hay un orbital s y tres p, las posibles hibridaciones son:

- orbital s + orbital $p \longrightarrow$ 2 orbitales híbridos sp
- orbital s + 2 orbitales $p \longrightarrow$ 3 orbitales híbridos sp^2
- orbital s + 3 orbitales $p \longrightarrow$ 4 orbitales híbridos sp^3

Es así que el enlace simple tiene hibridación sp^3, el doble sp^2 y el triple sp.

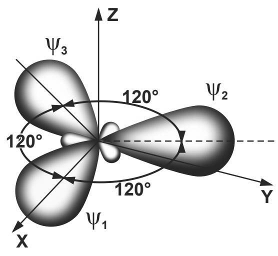
Su configuración electrónica, con cuatro electrones en el último orbital le permite formar estructuras moleculares con características físicas distintas. Las distintas disposiciones de los átomos de carbono en el espacio, le permiten presentar grandes diferencias en sus

[1] La hibridación de orbitales atómicos, es la "mezcla" de orbitales que da lugar a otros nuevos con características geométricas diferentes a las de los orbitales originales.

propiedades, por ejemplo, comparemos las diferencias entre el grafito que se exfolia con facilidad (por eso se usa en lápices de escribir) y el diamante que posee una particular dureza (por eso se usa en herramientas de cortado y pulido). A esta característica de algunos átomos de mostrar características físicas distintas en un mismo estado, se denomina *alotropía*.

Los compuestos orgánicos más simples son los que sólo contienen carbono e hidrógeno, a esta combinación del carbono con el elemento más abundante del Universo, se le denomina *hidrocarburo*, siendo el más sencillo de éstos el *metano*. Las estructuras en cadenas se denominan *hidrocarburos alifáticos*, también pueden existir con estructuras anulares o cíclicas, llamados compuestos *alicíclicos*.

El tercer tipo de hidrocarburos son los *aromáticos* formados por anillos en forma cíclica hexagonal con enlaces que resuenan entre uniones simples y dobles. El más sencillo representante de este tipo de hidrocarburo es el *benceno*. Aquellos formados con más anillos son llamados *hidrocarburos aromáticos policíclicos* (PAH) cuyo representante más simple, con solo dos anillos, es el *naftaleno*.



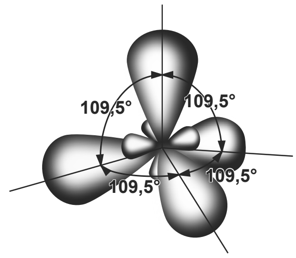


Figura D.1: Nube electrónica del carbono en configuración planar (sp^2). El grafito tiene esta configuración.

Figura D.2: Nube electrónica del carbono en configuración tetraédrica (sp^3). El diamante tiene esta configuración.

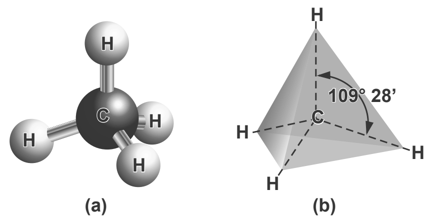


Figura D.3: Estructura tetraédrica del metano CH_4.

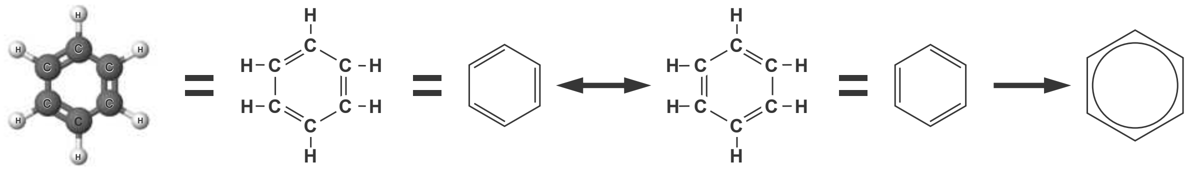


Figura D.4: Estructura del benceno (C_6H_6) y su representación. Debido a una propiedad de resonancia, los enlaces dobles pueden cambiar de posición, pero manteniendo la alternancia de enlaces simples y dobles, ésto se representa a través de un círculo al interior del hexágono.

D.1.1. Radicales libres

Los radicales libres, son átomos o grupos de átomos que poseen al menos un electrón desapareado, es decir, aquellos que se encuentran solos en un orbital, el que se dice que está semiocupado. Se producen por reacciones en que se rompen enlaces covalentes, a estos procesos se denominan *homólisis* o *fisión homolítica*. Un ejemplo es el radical $OH^{\cdot}$.

D.2. Aminoácidos

Los aminoácidos son moléculas que poseen una estructura bastante simple: un grupo amínico (NH_2), un grupo carboxílico (COOH) unidos por un carbono, llamado *alfa*, que está enlazado también con un hidrógeno y un grupo denominado genéricamente grupo

"R" que es diferente en cada aminoácido. Debido a lo anterior, son denominados también *alfa-aminoácidos*.

Los aminoácidos cumplen funciones variadas dentro de los seres vivos, entre las cuales destacan:

- Polimerización[2] y formación de proteínas
- Metabolismo de nitrógeno
- Síntesis de compuestos específicos
- Regulación de pH
- Neurotransmisores
- Hormonas[3]
- Regulación del poder hídrico (en vegetales)

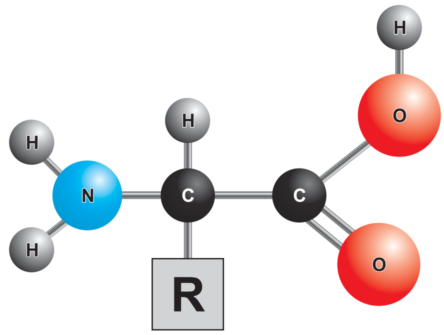


Figura D.5: Estructura genérica de un aminoácido.

Los aminoácidos son moléculas *quirales*. Las moléculas quirales, pueden existir en dos formas enantiométricas, esto es, que son una imagen especular de la otra (como en un espejo). Las formas enantiométricas de los aminoácidos se denominan configuración D o L. Éstas corresponden a la ubicación del grupo funcional cuando la cadena carbonada se sitúa en dirección vertical, con la parte más oxidada hacia arriba; el isómero D es el que presenta el grupo funcional a la derecha desde el punto de vista del observador, y el isómero L es el que tiene dicho grupo hacia la izquierda.

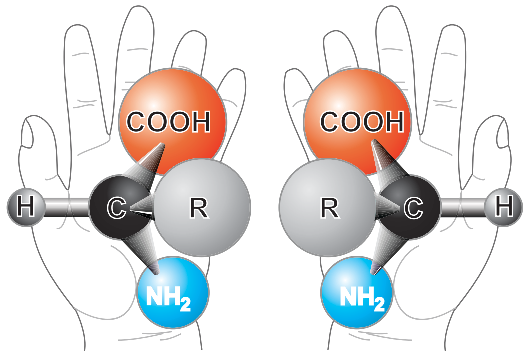


Figura D.6: Las dos formas enantiométricas de los aminoácidos L y D. Créditos: NASA.

Los aminoácidos que forman proteínas son de tipo L, por lo tanto, los aminoácidos más abundantes en el organismo son los *alfa-L-aminoácidos*, aunque existen otros aminoácidos no alfa, que están asociados a las funciones no proteicas que tienen los aminoácidos. Un ejemplo de esto último son las funciones neurotransmisoras del ácido gama aminobutírico (GABA).

Los aminoácidos son eléctricamente neutros, aunque la carga eléctrica de sus átomos está distribuida de forma tal que presentan polaridad y usualmente tienen una elevada solubilidad en agua.

Los aminoácidos tienen la propiedad de formar compuestos más complejos, llamados *péptidos*. Los péptidos son polímeros (del griego *πολυμερής*, que significa compuesto de muchas partes), es decir, moléculas resultantes de la unión en cadena de unidades básicas, llamados monómeros, en este caso de aminoácidos.

[2]Polimerización es un proceso químico por el que los reactivos, monómeros, se unen químicamente entre sí, dando lugar a una molécula de gran peso, llamada polímero, bien una cadena lineal o una macromolécula tridimensional.

[3]Las hormonas son sustancias segregadas por células especializadas (localizadas en glándulas), o también por células epiteliales e intersticiales con el fin de afectar (excitar, inhibir o regular) la función de otras células, órganos o sistemas de órganos.

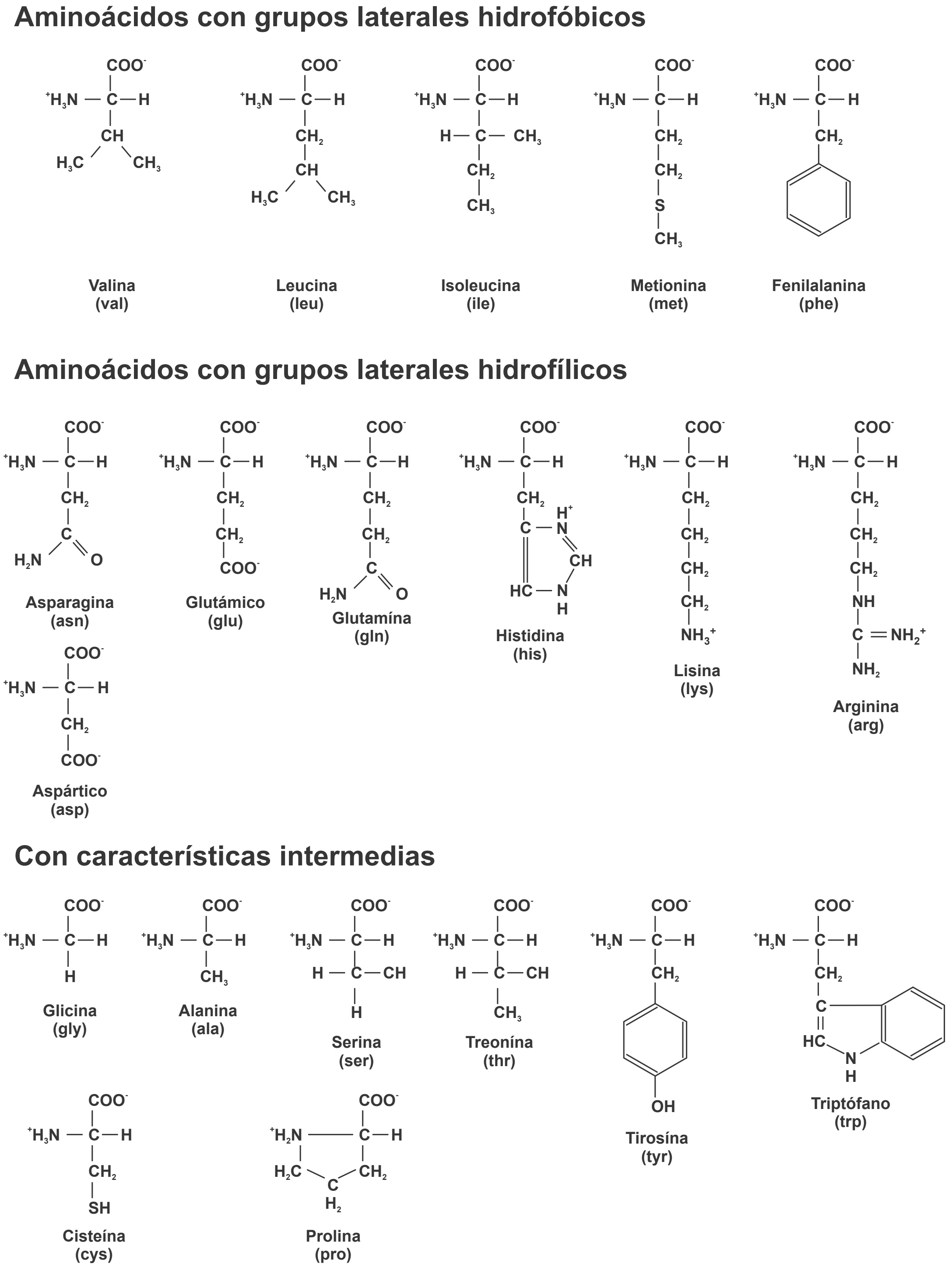


Figura D.7: Los veinte aminoácidos que constituyen los componentes básicos de las proteínas, y por ende los que componen la vida en la Tierra.

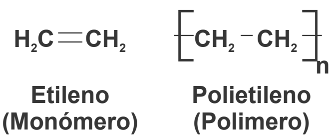


Figura D.8: El polietileno es un polímero cuya unidad es el etileno.

Hay diversos tipos de polímeros, un ejemplo sencillo de polímero artificial es el polietileno, compuesto de la unión de muchos etilenos ($CH_2 = CH_2$). Así un dietileno estaría formado por 4 átomos de carbono: H_3C-CH_2-CH_2-CH_3. Se pueden construir largas cadenas como el caso del polietileno que se usa en la elaboración de las bolsas plásticas.

La unión de cadenas de aminoácidos permite siempre distinguir en sus extremos a dos

grupos funcionales distintos, y por ello es posible designar a uno de ellos como la cabeza (el grupo α-amino) y al otro como la cola (el carboxilo).

D.2.1. Puentes de hidrógeno

Cuando un átomo electronegativo[4] experimenta atracción por un átomo de hidrógeno que está formando parte de distintos enlaces covalentes polares, se dice que ha formado un *puente de hidrógeno*. En realidad, el puente de hidrógeno es un caso particular de la interacción dipolo-dipolo: el átomo con mayor electronegatividad atraerá hacia sí los electrones del enlace, formándose un dipolo negativo, mientras que el átomo de hidrógeno, al ceder parcialmente sus electrones, genera un dipolo de carga positiva en su entorno. Estas cargas opuestas se atraen.

El puente de hidrógeno puede ser intermolecular (en el caso del agua por ejemplo) o puede darse también dentro de una misma molécula, siendo denominado en este caso puente de hidrógeno intramolecular.

En el caso del agua (figura D.9), cuando las moléculas de agua están juntas, sus regiones positivas y negativas son atraídas por las regiones con carga opuesta de las moléculas vecinas. Cada molécula de agua interactúa con otras cuatro a través de puentes de hidrógeno. Los puentes de hidrógeno que se forman entre las moléculas de agua explican algunas de las esenciales y únicas propiedades del agua.

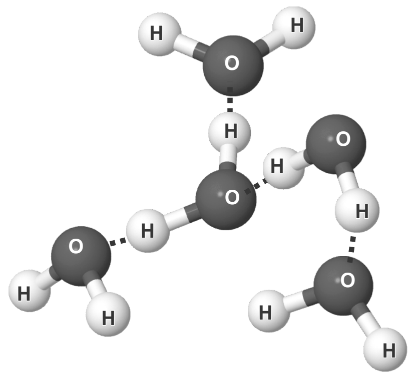


Figura D.9: La interacción eléctrica, mostrada aquí con una líneas paralelas, entre hidrógenos con carga positiva y oxígenos con carga negativa mantiene ligadas a las moléculas y se denominan puentes de hidrógeno.

La atracción creada por puentes de hidrógeno mantiene líquida al agua en un amplio rango de temperaturas, mayor que el que posee cualquier otra molécula de su tamaño.

La alta energía requerida para romper múltiples puentes de hidrógeno es la causa de que el agua tenga un alto *calor de vaporización*; esto es, una gran cantidad de energía se necesita para convertir agua líquida en vapor de agua, debido a que las moléculas son atraídas a través de sus puentes de hidrógeno. Por lo mismo, muchos mamíferos usan el sudor para su enfriamiento, ya que si una parte del sudor se evapora, enfría el líquido que permanece por debajo, porque extraen de éste el calor de vaporización necesario para realizar el cambio de fase al estado gaseoso.

Los puentes de hidrógeno son más débiles que un enlace, y poseen solo el 5 % de la cohesión de un enlace covalente; sin embargo, cuando muchos puentes de hidrógeno se pueden formar entre dos moléculas (o partes de la misma molécula), la unión resultante puede ser lo suficientemente firme para ser estable.

Los puentes de hidrógeno se pueden encontrar en diversos tipos de moléculas, ya sea:

- Manteniendo juntas dos hebras de la doble hélice del ADN.
- Manteniendo polipéptidos juntos en estructuras secundarias como las alfa hélices y las conformaciones beta.

[4] La electronegatividad de un elemento es la capacidad que tiene un átomo de dicho elemento para atraer hacia sí los electrones, cuando forma parte de un compuesto.

- Ayudando a las enzimas a ligar sus sustratos.
- Ayudando anticuerpos a ligar sus antígenos.
- Ayudando a los causantes de la trascripción a ligar el DNA.

D.2.2. Enlace peptídico

Hay varias maneras que dos aminoácidos se unan entre sí, pero solo una de éstas permite siempre dejar un lugar para que se añada otro aminoácido, esta es, empalmar la cabeza de uno con la cola del otro, dejando así la cabeza del primero y la cola del último libres para permitir la unión de nuevos aminoácidos.

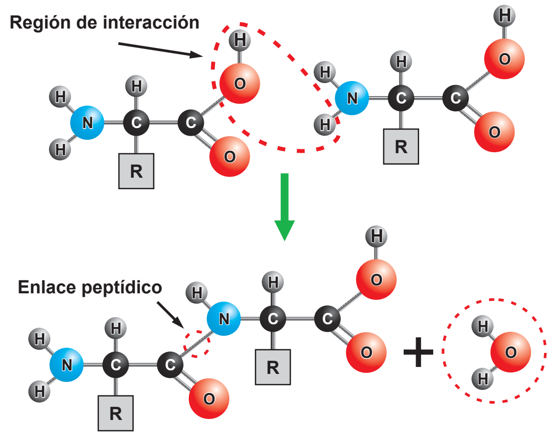


Figura D.10: Formación de una enlace peptídico entre dos aminoácidos y liberación de agua.

Los compuestos formados por la reacción de un ácido carboxílico con una amina se denominan *amidas*. Producto de la reacción, el nitrógeno que posee cinco electrones en el nivel más externo, queda con un par de electrones no compartidos. Resulta que estos electrones permiten generar formas resonantes, esto quiere decir, que los electrones no compartidos se redistribuyen comportándose como un enlace híbrido más parecido a un doble enlace. La distancia de enlace es intermedia entre los 1,49 [Å] de un enlace simple C-N y los 1,27 [Å] de un enlace doble C=N, con un valor de 1,32 [Å]. El enlace amida formado entre dos α-aminoácidos recibe el nombre de *enlace peptídico*.

Esto tiene consecuencias en la geometría de los átomos alrededor del enlace. Los seis átomos del grupo peptídico se encuentran en el mismo plano, denominado *plano peptídico*, debido al carácter parcial de doble enlace que presenta el enlace peptídico.

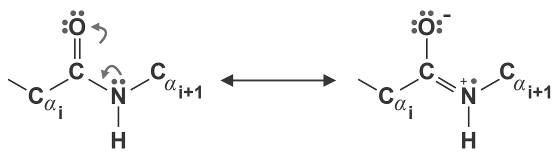


Figura D.11: El enlace peptídico es un híbrido de resonancia en el cual los electrones están compartidos entre el oxígeno del carbonilo, el carbono del carbonilo y el nitrógeno del grupo amida.

El electrón del nitrógeno que no forma parte del enlace peptídico, se enlaza con un átomo de hidrógeno, quedando en condiciones de formar un puente de hidrógeno. Por otra parte, el oxígeno del carbonilo[5] puede atraer hidrógenos permitiendo también la formación de puentes de hidrógeno. Así, un enlace peptídico puede "aceptar" un puente de hidrógeno y "donar" otro simultáneamente. Sin embargo, las restricciones geométricas hacen que esto no pueda ocurrir internamente, es decir, para que se puedan formar estos puentes de hidrógeno se requiere que otros átomos, de la misma o de otra molécula, estén lo suficientemente cerca del enlace peptídico.

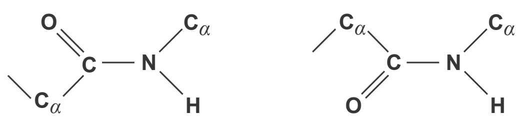


Figura D.12: El enlace peptídico puede ser *trans* (izquierda) o *cis* (derecha), siendo la forma trans la dominante.

[5]El grupo carbonilo es un grupo funcional que consiste en un átomo de carbono con un doble enlace a un átomo de oxígeno.

Los aminoácidos unidos por enlaces peptídicos no pueden seguir llamándose aminoácidos, se denominan dipéptidos o polipéptidos dependiendo del número de aminoácidos y enlaces peptídicos.

A diferencia de una cadena lineal de hidrocarburos como el polietileno, que es perfectamente simétrica y no se puede distinguir el principio del final, un polímero de aminoácidos tiene dos extremos perfectamente distinguibles. Un extremo de un péptido es llamado *N-terminal* o amino terminal, tiene un grupo amino libre, y el otro extremo, tiene un grupo carboxilato, es llamado *C-terminal* o carboxilato terminal.

Dos aminoácidos se pueden combinar de dos formas distintas, y por ende ambos dipéptidos son diferentes. Por ejemplo con los aminoácidos alanina y la serina se pueden formar los dipéptidos *ala-ser* y *ser-ala*. El primero resulta de la unión del grupo -COOH de la alanina con el -NH_2 de la serina, y el segundo resulta de la unión del grupo -COOH de la serina con el -NH_2 de la alanina.

D.3. Proteínas

Las proteínas (del griego $\pi\rho\omega\tau\varepsilon\tilde{\iota}o\nu$, preeminente, primer premio) son polímeros lineales constituidos de uno o más polipéptidos, llegando a poseer en algunos casos hasta cerca de 30.000 aminoácidos, aunque en promedio tienen entre 300 a 350.

La gran cantidad de polipéptidos que se pueden formar con 20 aminoácidos permite que las proteínas tengan funciones tan variadas como:

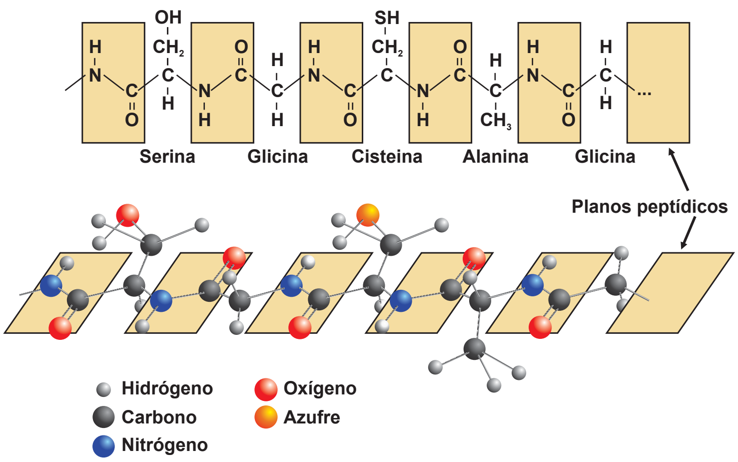


Figura D.13: Un polipéptido puede ser considerado como una sucesión de planos peptídicos.

- Catalizadores (enzimas).
- Trasporte de electrones, iones y sustancias (lípidos, hierro, cobre, etc.).
- Anticuerpos, hormonas.

Aunque cada péptido se encuentra contenido en un plano rígido (figura D.13), los distintos planos peptídicos pueden rotar en torno al enlace que une al carbono alfa con el N del plano anterior (ángulo ϕ (phi)), y en torno al enlace que une al carbono alfa con el C del plano posterior (ángulo ψ (psi)).

La conformación global del polipéptido está determinada por los ángulos ϕ y ψ de cada carbono alfa. Obviamente los valores de ϕ y ψ no pueden tomar cualquier valor, pues se producirían choques entre los distintos planos peptídicos. Las zonas permitidas se determinan a través del *diagrama de Ramachandran*.

Las distintas conformaciones espaciales que pueden tomar las cadenas polipeptídicas permiten clasificar a las proteínas en estructuras primarias, secundarias, terciarias y cuaternarias.

D.3.1. Estructura primaria

La estructura primaria de una proteína es una secuencia lineal de aminoácidos.

El conocimiento de la estructura primaria de una proteína es fundamental para entender su función, ya que ésta depende de la secuencia de aminoácidos y de la forma que adopte la proteína.

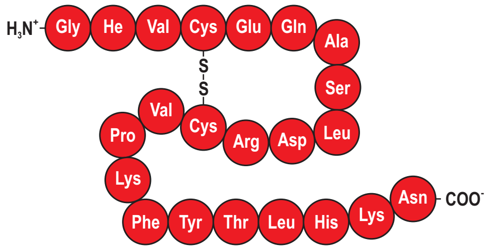


Figura D.14: Un ejemplo de estructura primaria.

D.3.2. Estructura secundaria

Producto de la formación de puentes de hidrógeno entre los átomos que forman los distintos enlaces peptídicos, la cadena polipeptídica adquiere una estructura plegada.

La mayor parte de las proteínas contienen uno o más tramos de aminoácidos que adquieren estructuras plegadas. Las más comunes son las alfa hélices y la conformación beta.

D.3.2.1. Alfa hélices

Las cadenas polipeptídicas se tuercen en forma helicoidal dextrógira o en dirección horaria (mano derecha) gracias a los giros en torno al carbono alfa de cada aminoácido.

La hélice se mantiene gracias a los puentes de hidrógeno [-N-H·····O=C-] formados entre el grupo -NH de un enlace peptídico y el grupo -C=O del cuarto aminoácido que se ubica justo debajo de él en la hélice (figura D.15).

Las hélices completan una vuelta cada 3,6 aminoácidos, y los grupos R se ubican en los aminoácidos de forma que se extienden hacia el exterior.

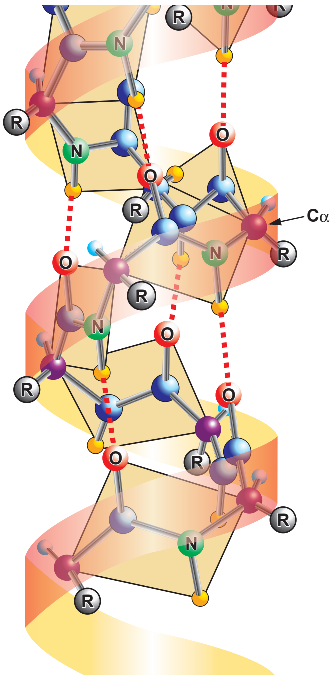


Figura D.15: La alfa hélice se mantiene gracias a los puentes de hidrógeno [-N-H·····O=C-] entre dos aminoácidos separados por cuatro aminoácidos.

D.3.2.2. Conformación beta

Otro tipo de estructura secundaria se forma con pares de cadenas completamente extendidas unas al lado de las otras unidas gracias a los puentes de hidrógenos entre el grupo carbonilo de una cadena y el grupo -NH de la cadena adyacente, conformando una estructura que es más flexible que elástica. Estas cadenas pueden pertenecer a regiones diferentes de una misma cadena peptídica.

Las cadenas son a menudo "antiparalelas"; el N-terminal y el C-terminal de una, están invertidos respecto de las adyacentes.

La proteína de la seda, la fibroína, y el núcleo de muchas proteínas globulares están formadas por una estructura de lámina plegada beta.

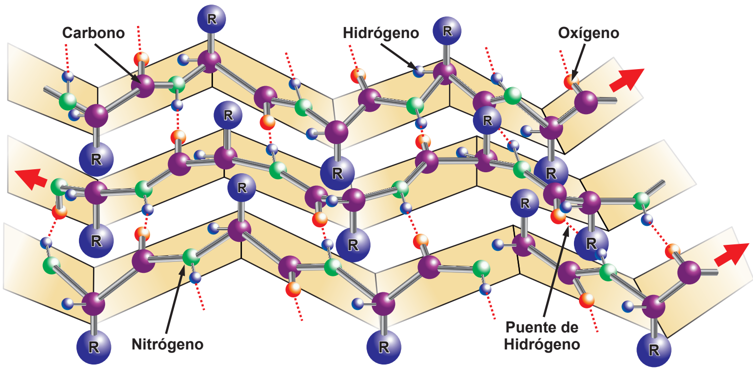


Figura D.16: Conformación beta antiparalela.

D.3.3. Estructura terciaria

La cadena polipeptídica, constituida de estructuras primarias y secundarias denominadas dominios, se pliega en el espacio producto de distintas interacciones, formando la denominada estructura terciaria. Esta estructura es mantenida por diversos tipos de interacciones (enlaces covalentes entre dos cisteínas o puentes disulfuro, puentes de hidrógeno, interacciones iónicas e interacciones hidrofóbicas entre cadenas laterales y las interacciones de van der Waals).

Los aminoácidos se ordenan de forma tal que aquellos apolares se sitúan hacia el interior y los polares hacia el exterior.

Para representar y resaltar la estructura secundaria al interior de la estructura terciaria, se representa los segmentos de conformación beta como flechas planas (ribbons) y las alfa hélices como cintas en espiral.

La función de una proteína (excepto como alimento) depende de su estructura terciaria. Si ésta se rompe, la proteína se desnaturaliza y pierde su función. Por ejemplo

- La desnaturalización de enzimas produce pérdida en su poder catalizador

- La desnaturalización de un anticuerpo puede impedir ligar antígenos

D.3.4. Estructura cuaternaria

Las proteínas pueden estar compuestas por más de una cadena polipeptídica mantenidas unidas por interacciones no covalentes, pero en zonas precisas y con una precisa configuración 3-D.

D.4. Las proteasas

Existe un innumerable tipo de proteínas, a modo de ejemplo, revisaremos las serin-proteasas. Las proteasas son enzimas[6] que rompen los enlaces peptídicos de las proteínas, separando los aminoácidos constituyentes de la proteína. Para conseguirlo requieren de una molécula de agua por cada enlace peptídico a romper.

[6]Las enzimas son sustancias de naturaleza proteica que catalizan reacciones químicas, siempre que sea termodinámicamente posible.

Las serin-proteasas se subdividen en:

- Grupo A:
  - Tripsina
  - Quimotripsina
  - Elastasa
  - Trombina
- Grupo B:
  - Subtilisina

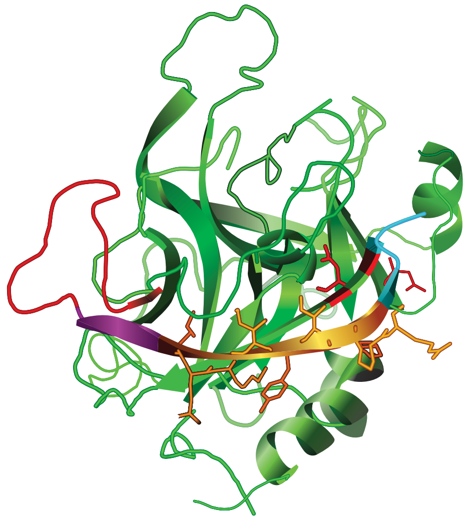


Figura D.17: La trombina, una serin-proteasa que se forma como parte del proceso de coagulación sanguínea.

Los miembros de cada grupo tienen un ancestro común.

Las serin-proteasas son muy útiles en los procesos digestivos, pero son particularmente dañinos en anticoagulantes de la saliva de zancudos y murciélagos, en venenos de algunas serpientes y en procesos de muerte neuronal.

En las serin-proteasas existe una zona hueca, denominada *sitio activo*, donde se produce actividad catalítica. Allí hay tres aminoácidos, la *triada catalítica* (aspártico N°102, histidina N°57 y serina N°195), en los cuales los grupos R se encuentran físicamente muy próximos (figura D.18).

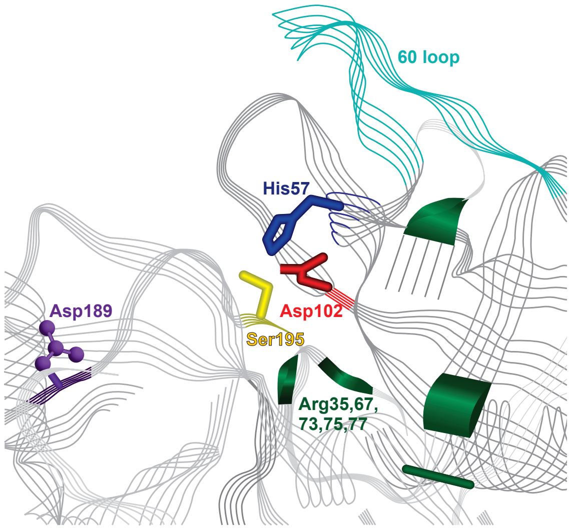


Figura D.18: Triada catalítica (Asp102, His57 y Ser195) de la zona activa de una serin-proteasa.

Otras proteasas que poseen un mismo sitio activo han evolucionado para cumplir la misma función catalítica, por ejemplo los grupos A y B se han hecho similares a través de un proceso de evolución, denominado convergente.

Cuando la proteína adecuada pasa por el sitio activo, es fijada a través de puentes de hidrógeno a tres aminoácidos de la zona activa y a través de varios procesos que no detallaremos aquí (gracias a interacciones hidrofóbicas), se logra cortar la proteína en sus aminoácidos componentes.

Para detener el proceso de corte de proteínas actúan los denominados inhibidores, que son pequeñas proteínas (del orden de 50 a 60 aminoácidos) que las bloquean para que éstas no realicen la función catalítica.

Una falla de estos inhibidores produce una enfermedad conocida como *pancreatitis aguda*. En este caso las proteasas continúan su actividad catalítica incluso después de acabadas las proteínas del alimento, al punto de comenzar a cortar las proteínas del páncreas, reduciéndolo a un montón de aminoácidos.

Un polipéptido derivado de tejidos de bovino, es usado como inhibidor de enzimas como la tripsina y la plasmina. Algunos ejemplos de aplicación son:

- En el tratamiento de hemorragias asociadas con altas concentraciones de plasmina en el plasma sanguíneo.
- En la reducción de la pérdida de sangre y los requerimientos de transfusión en pacientes con alto riesgo de grandes pérdidas durante y después de operaciones a corazón abierto con circulación extracorpórea.

D.5. Ácidos nucleicos

Un grupo importante de biomoléculas son los ácidos nucleicos. Estas macromoléculas son polímeros formados por la sucesión de cuatro monómeros denominados nucleótidos.

Los nucleótidos están compuestos de una base nitrogenada, un azúcar (ribosa o desoxirribosa), y un grupo fosfato.

En la naturaleza existen dos tipos de ácidos nucleicos: el ácido ribonucleico (ARN) y el ácido desoxirribonucleico (ADN).

D.5.1. Bases nitrogenadas

Las bases nitrogenadas son compuestos orgánicos cíclicos, que contienen dos o más átomos de nitrógeno. Solo cinco de las bases nitrogenadas se encuentran constituyendo los ácidos nucleicos.

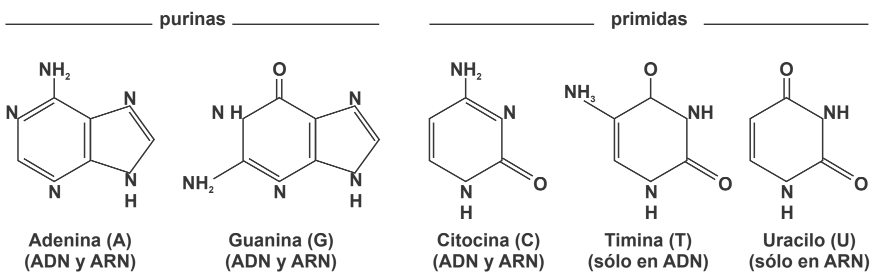


Figura D.19: Cinco de las bases nitrogenadas que se encuentran constituyendo los ácidos nucleicos.

Se clasifican en tres grupos:

- Bases isoaloxazínicas, que son derivadas de la estructura de la isoaloxazina.
- Bases púricas, que son derivadas de la estructura de la purina.
- Bases pirimídicas, que son derivadas de la estructura de la pirimidina.

Algo extremadamente relevante lo constituye la complementariedad entre algunas bases, permitiendo la formación de pares, siendo esto fundamental para la estructura del ADN y para procesos como la replicación del ADN y la traducción del ARN en proteínas.

Citosina con guanina forman pares a través de puentes de hidrógeno, tanto en el ADN (figura D.21) como en el ARN. En cambio, el uracilo y la timina, pueden formar puentes de hidrógeno con la adenina, el primero en el ARN y el segundo en el ADN.

D.5.2. Ácido ribonucleico

El ácido ribonucleico (ARN o RNA) es un polímero lineal de nucleótidos (monómeros) que forman una larga cadena, cada nucleótido está formado por un grupo fosfato, una azúcar pentosa (de cinco carbonos), denominada ribosa, y una base nitrogenada.

Los nucleótidos del ARN contienen entre sus bases nitrogenadas al uracilo. Aunque en general las cadenas son individuales, las bases se pueden parear de acuerdo a las siguientes combinaciones:

- Uracilo con Adenina (A-U).
- Citosina con Guanina (C-G).

Existen varios tipos de ARN:

- ARN mensajero.
- ARN de transferencia.
- ARN ribosomal.
- ARN de interferencia.

El código genético de las células se encuentra en forma de ADN. Dentro de las moléculas de ADN se encuentra la información necesaria para sintetizar las proteínas que utiliza el organismo.

El ARN puede moverse dentro de las células de los organismos vivos, sirviendo como un portador de información genética, transmitiendo la información guardada en el ADN hacia otras partes de la célula donde se usa para producir proteínas.

El ARN es transcrito desde el ADN por enzimas llamadas ARN polimerasas y procesado por muchas más proteínas.

El ARN es el principal material genético usado en los organismos llamados virus, y el ARN también es importante en la producción de proteínas en otros organismos vivos.

D.5.3. Ácido desoxirribonucleico

El ácido desoxirribonucleico (ADN o DNA), es un polímero de nucleótidos. Estos nucleótidos están constituidos por el carbohidrato desoxirribosa. La desoxirribosa es un monosacárido de cinco átomos de carbono (pentosa) derivado de la ribosa. Su estructura es semejante a la ribosa, pero el segundo carbono no posee un grupo alcohol.

Los nucleótidos del ADN contienen entre sus bases nitrogenadas las combinaciones de pares de bases:

- Timina con Adenina: (A-T)
- Citosina con Guanina (C-G)

El ADN constituye, junto con el ARN, el principal componente del material genético de la inmensa mayoría de los organismos siendo el componente químico primario de los cromosomas[7] y el material en el que los genes[8] están codificados.

Su función principal es codificar las instrucciones esenciales que permiten construir y sostener a un ser vivo que es idéntico a aquel del que proviene (o casi similar, en el caso de mezclarse con otra cadena como es el caso de la reproducción sexual o de las mutaciones).

[7]Cromosoma (de cromo- y del griego $\sigma\tilde{\omega}\mu\alpha$, cuerpo). Es un filamento condensado de ácido desoxirribonucleico, visible en el núcleo de las células durante la mitosis. Su número es constante para cada especie animal o vegetal.

[8]Gen (De la raíz del latín *genus*). Es la secuencia de ADN que constituye la unidad funcional para la transmisión de los caracteres hereditarios.

La estructura del ADN está formada por un par de largas hebras, que están constituidas por cadenas de nucleótidos, que forman una estructura de doble hélice. Cada vuelta está formada por 10,4 pares de nucleótidos. La doble hélice más frecuente es una espiral de tipo mano derecha. Esta estructura fue descubierta en 1953, a partir de una fotografía de Rosalind Franklin, por James Watson y Francis Crick.

El rasgo fundamental de la estructura del ADN es que cada base nitrogenada de una hebra "encaja" con una base de la otra, de forma que la adenina siempre se enfrenta a la timina (A-T) y la guanina siempre a la citosina (G-C).

La adenina se une a la timina mediante dos puentes de hidrógeno, mientras que la guanina y la citosina lo hacen mediante tres puentes de hidrógeno; por ello una cadena de ADN que posea un mayor número de parejas de C-G es más estable.

El ADN se puede "desdoblar". Esto permite la lectura de la información codificada y su posterior copia. Esta información corresponde a la especificación de las proteínas, siendo el ADN una especie de "receta" para fabricar las proteínas.

El código está conformado por un grupo de tres nucleótidos (triplete), y se representan por las tres letras iniciales de las bases nitrogenadas. La transcripción de dicho código determina la relación de la secuencia de aminoácidos de una proteína.

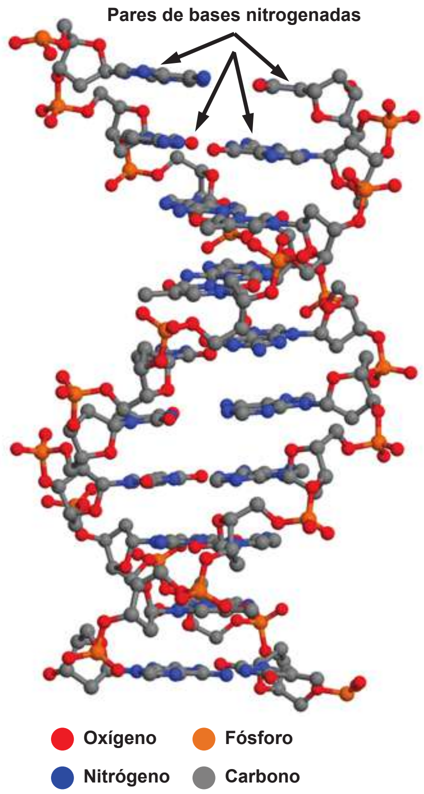


Figura D.20: Estructura de un segmento de una doble hélice de ADN. Las bases se encuentran horizontalmente entre las dos hebras en espiral. Figura obtenida con Jmol: un visor Java de código abierto para estructuras químicas en tres dimensiones. http://www.jmol.org/.

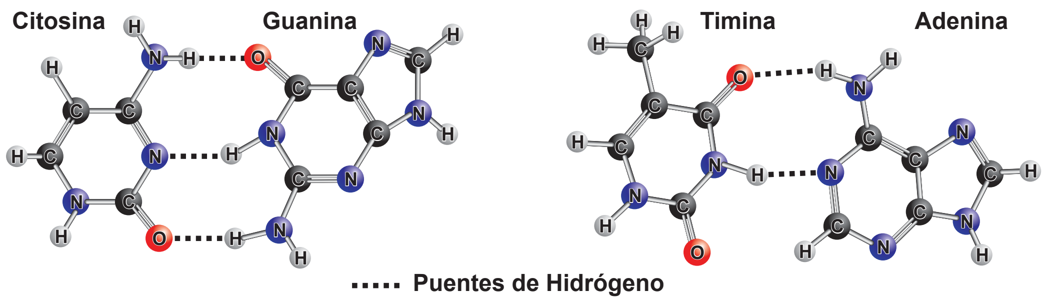


Figura D.21: Puentes de hidrógeno entre pares de bases del ADN.

La modificación del ADN o un error de transcripción puede provocar una disfunción proteica que puede dar lugar a una enfermedad o en algunos pocos casos dar lugar a lo que hemos denominamos evolución biológica.

D.6. Virus

Como un ejemplo de la decodificación de los ácidos nucleicos estudiemos un tipo especial de virus, los *retrovirus*.

Los virus son entidades de estructura microscópica, y que sólo se desarrollan dentro de células vivas, debido a ello son parásitos.

El *virión* o partícula vírica está compuesto por:

- *Ácido nucleico vírico:* Puede ser ADN o ARN de cadena doble o sencilla.
- *Proteínas víricas:* Forman la cubierta externa o *cápside* y proteínas enzimáticas y aglutinantes.

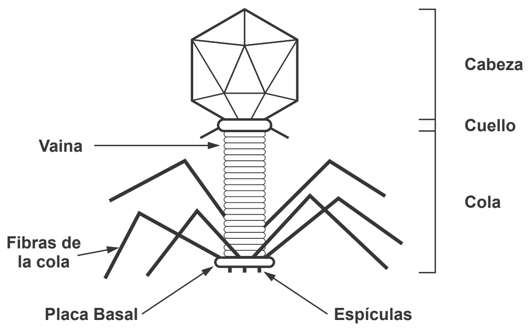


Figura D.22: Cápside icosaédrico de un virus bacteriófago T4.

La cápside está compuesta por subunidades, los capsómeros, que son proteínas estructurales, que forman estructuras de tipo helicoidal, icosaédrica o compleja, distinguiéndose una cabeza y una cola. Esta estructura puede estar rodeada por una envoltura lipídica con diferentes proteínas.

Un tipo particular de virus son los llamados retrovirus, los cuales cambian su material genético en forma de ARN monocatenario en ADN bicatenario antes de la reproducción celular de la célula huésped. Este proceso se lleva a cabo mediante una enzima: la *reversotranscriptasa* o *transcriptasa inversa*.

Los retrovirus más conocidos son aquellos que causan la inmunodeficiencia en humanos (VIH). En este caso el VIH es el agente infeccioso cuya célula huésped es el *linfocito T4*[9], que al ser destruido en grandes cantidades produce el *síndrome de inmunodeficiencia adquirida* (SIDA), que puede tardar en desarrollarse más de diez años.

La cubierta está rodeada por una envoltura lipídica que el virus obtiene de la membrana del linfocito T. Esta membrana posee proteínas y un pequeño agregado de carbohidrato, lo que lo favorece en su capacidad infecciosa, pero también lo hace sensible al detergente común, al cloro y a las temperaturas mayores a 70 °C (pasteurización).

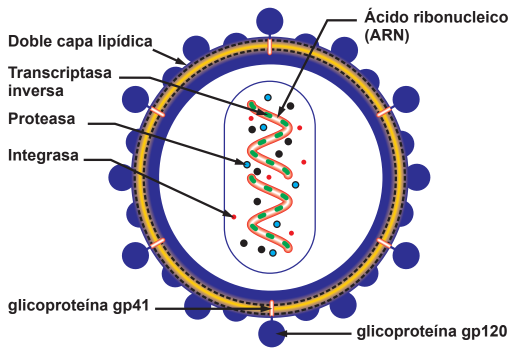


Figura D.23: Estructura del VIH-1.

Las proteínas que sobresalen de esta cubierta son las glicoproteínas transmembrana virales gp41 y las glicoproteínas de cubierta gp120, que permiten la unión del VIH al linfocito. En el interior de la cubierta, la proteína del núcleo viral p17 constituye la matriz del virión, y la proteína p24 del núcleocápside o core forma un nucleoide interno de forma cilíndrica. Este nucleoide tiene en su interior dos hebras del genoma ARN-viral, y la enzima reversotranscriptasa. El material genético regula la presencia y cantidad de cada uno de los componentes del virus.

Si el receptor del virus se encuentra con la proteína CD4, que posee el linfocito, se produce la unión entre ambos, luego el VIH ingresa al linfocito. En este momento el ARN es transformado en ADN (transcripción en sentido inverso) por la enzima reversotranscriptasa para luego unirse al ADN del linfocito.

[9] Los linfocitos T son un tipo de glóbulos blancos responsables de la respuesta inmune. Se caracterizan por poseer un receptor especial en la superficie de la membrana llamado *receptor de las células T* (TCR).

Cuando se detecta un microorganismo, el linfocito se activa y comienza a reproducir su ADN para aumentar la cantidad de linfocitos. El ADN viral utiliza los mecanismos de replicación del linfocito para su transcripción a ARN mensajero (ARNm) y a nuevas hebras de ARN genómico viral. Se produce entonces la traducción del ARNm viral a proteínas virales, y el ensamblaje de nuevos viriones dentro de la célula. Llegado el momento en que éstos nuevos viriones llenan el interior de la célula, comienzan a agujerear la cubierta del linfocito, cubriéndose con ésta.

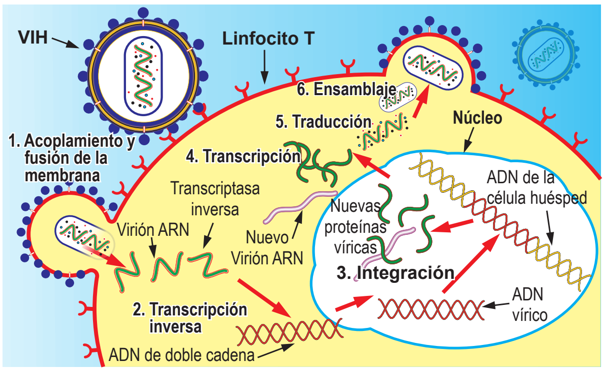


Figura D.24: Ciclo de reproducción del VIH en la célula huésped.

Así, al producirse nuevas infecciones, en vez de aumentar la cantidad de linfocitos T, disminuye, produciendo un desequilibrio en el organismo, además aumenta en forma incontrolable la cantidad de VIH. Es así como luego de un tiempo se producirá la inmunodeficiencia.

El VIH presenta una serie de mecanismos que le permiten burlar la respuesta inmunológica:

- Estando dentro del huésped no es posible identificarlo, y por ende erradicarlo.
- Posee una alta variabilidad vírica.

La tasa de equivocación (o mutación) de la transcriptasa es similar a la de otros virus ARN inversa, sin embargo, sus elevadísimas tasas de replicación (10^9-10^{10}) amplifican extraordinariamente el número de mutaciones, permitiendo generar variantes que escapan al control inmunológico, afectando negativamente en la producción de una vacuna. Además, la activación de las células latentes ocurre de manera masiva y en lugares (centros germinales de los órganos linfoides) donde los anticuerpos llegan con dificultad.

D.7. Bibliografía del capítulo

- *Física. Volumen I, Mecánica, Radiación y Calor.* R. Feynman, R. Leighton & M. Sands. *Addison Wesley Iberoamericana.* 1987.
- *Química General.* R. Petrucci, W. Harwood & G. Herring. *Pentrice Hall.* 2003.

Epílogo

Han pasado dos años de la publicación del primer volumen y estoy gratamente satisfecho por la buena acogida que ha tenido el texto y por la gran difusión que ha tenido a través de Internet.

Este segundo volumen se dedica a profundizar tres de las distintas áreas de estudio de la astronomía y astrofísica que hemos descrito superficialmente en el primer capítulo del primer volumen: estrellas, planetas y astrobiología.

Este texto no es un libro de divulgación, sino que está escrito para estudiantes universitarios que durante su primer año cursen alguna asignatura de astronomía introductoria, pese a ello, no puedo desconocer la gran recepción del primer volumen de este libro entre aficionados y autodidactas, a ellos sugiero que si deciden leer o estudiar este texto, sean pacientes ya que con toda seguridad encontrarán temas que no son fáciles de seguir y quizás por lo mismo, algunas secciones requieran de varias relecturas y/o recurrir constantemente a los apéndices antes de seguir avanzando.

Creo que es importante aclarar que si bien he intentado complementar los contenidos de este segundo volumen con algo de historia y los personajes que contribuyeron al descubrimiento de los conocimientos, los contenidos no están presentados en el orden cronológico de como se llegó a dicho conocimiento, ni tampoco el texto pretende ser un libro de historia de la astronomía.

Durante el año 2011 tuve la oportunidad de impartir un curso optativo de astrofísica para los alumnos de licenciatura en física e ingeniería en la Universidad Técnica Federico Santa María, donde hemos estudiado algunos contenidos de este texto, entre otras cosas las estrellas (el Sol, medio interestelar, formación estelar y evolución estelar), aunque como es natural, con mayor nivel de profundidad. Esto me ha hecho reflexionar de la necesidad de un texto actualizado de astrofísica introductoria en español que incluya temas de astronomía observacional, quizás me anime en un futuro próximo en transformar los apuntes preparados para dicha clase en un nuevo texto.

Transformar los apuntes de clases en este texto y terminar de escribirlo, ha sido un trabajo largo y muy agotador, que ha consumido mi tiempo libre, de ocio y familiar de al menos los últimos 8 o 9 meses y me ha hecho postergar otras cosas, sin embargo, ver como poco a poco las imágenes reemplazan los bocetos originales y ver como el texto toma forma es a lo menos excitante. Espero que el libro logre satisfacer a sus lectores, en particular, para aquellos que fue escrito: estudiantes y profesores, y que logre ser un material útil tanto para ellos como para cursos de astronomía introductoria.

Lamentablemente, el gran número de figuras y fotografías del texto lo hacen relativamente costoso, en compensación, he decidido, con el consentimiento de la Editorial USM, dejar la versión digital de este texto a libre distribución a través de Internet.

Isaías Rojas Peña.

Padua, julio de 2012.

Imágenes usadas al inicio de capítulos:

Capítulo 4: Las Pléyades. Créditos y copyright: David Malin & Australian Astronomical Observatory.

Capítulo 5: La Tierra elevándose sobre el horizonte lunar, fotografiada desde el *Apollo 8* el 25 de diciembre de 1968. Créditos y copyright: Bill Anders & NASA.

Capítulo 6: La señal *Wow!*. Créditos y copyright: The Big Ear Radio Observatory.

Índice Alfabético

Año-luz, III
Aceleración, III
Ácidos nucleicos, XLVIII, L, LI, 199, 200, 209–211
Actividad sísmica
  de origen magmático, 130
  de origen tectónico, 130
ADN, XLII, XLVIII–LII, 200, 206, 208, 209, 216
Agujero negro, III, 110
  Radio de Schwarzschild, 111
Albedo, 192, 240
Aminoácidos, XXXIX–XLI, XLIII–XLVII, L, 199, 206–209, 211, 214, 238
Anaxágoras, 213
Anfipáticas, moleculas, 210, 212
Archaea/Arquea, 205, 221
Aristóteles, XXIV, 200
ARN, XLVIII, XLIX, 208, 209
  Catalizador, 208
  Mundo del, 208, 209
Asteroides, 116, 168
  Amor, 169
  Apolo, 169
  Centauros, 169
  Cercanos a la Tierra, 169
  Distintos tipos de, 179
  Juno, 116
  Palas, 116
  Tipo C, 161, 170
  Tipo M, 170
  Tipo S, 170
  Troyanos, 168
  Vesta, 116
Astrosismología, 80, 125
Atómico
  Núcleo, V, XXX
  Número, V, XXVIII, XXXVI
Átomo, III, XXIV
  Estado excitado, XXIX
Auroras, 86, 133, 136, 154, 162

Bacteria, 198, 215, 220, 221, 225, 238
  Cianobacteria, 203, 204
  Magnetotáctica, 228, 229
  Metanogénica, 239
Big-Bang, III, 219
Big-Crunch, III
Biomarcador, 240, 244
Bode, Johann Elert, 116
Bombardeo pesado tardío, 178

Cámaras magmáticas, 129
Célula
  de Ferrel, 134
  de Hadley, 133, 140, 144
  Polar, 134
Cadena protón-protón, 76, 90
Calentamiento mareal, 224
Campo
  Eléctrico, XXII
  Magnético, III
  Unificado, teoría de, VI
Carga eléctrica, III, XXI
Cassini
  División de, 115, 152
  Giovanni Domenico, 115
  Sonda, 153, 165, 167
Centro de masas, 124, 181, 182
Ceres, 116, 155
Cero absoluto, III
Chandrasekhar
  Límite de, V, 103, 219
  Subrahmanyan, 103
Chorros de plasma, 110
Ciclo de Croll-Milankovitch, 224
Ciclo del carbono, 204, 223

Cinturón de Kuiper, 114, 118, 121, 155, 157, 158, 170, 171, 178
Cinturones de van Allen, 135
Colapso gravitacional, 105
Cometas, 171, 172
Condrita carbonácea, 161, 207
Cono de luz, III
Conservación
  de la energía, III
  del momentum angular, 93
Constante cosmológica, III
Contracción gravitacional, 93, 97, 103, 104
Convección, 78
Coordenadas, III
Coronografía, 186
Corrimiento hacia el rojo, IV, XI
Cosmología, III
Criovulcanismo, 232
Cuanto, IV, XXIII

Decaimiento, XXXIII
  Beta, XXXIII, 104, 219
  Beta inverso, XXXIII, 76, 104
  Gamma, XXXIII
  Radiactivo, IV
Declinación magnética, 136
Demócrito, XXIV
Deriva continental, 128
Desplazamiento de líneas espectrales, 80
Deuterio, 76, 79, 95, 121
Diagrama de mariposa, 88
Dimensión espacial, IV
Disco protoplanetario, 175, 186, 193, 199
Dispersión Rayleigh, 241, 243
Dominios magnéticos, 136
Doppler
  Christian, X
  Desplazamiento, 80
  Efecto, X, 183
Dragado
  Primer, 98
  Segundo, 98
Dualidad onda/partícula, IV, XXIV, XXVI

Ecuación de Drake, 232, 233
Ecuación de Schrödinger, XXVII, XXIX
Efecto
  Coriolis, 133
  Doppler, X
  Fotoeléctrico, XXIII
  Invernadero, 138, 141, 165, 191, 192, 202, 230, 238
  Túnel, XXXIV
Einstein, Albert, XXIII, 76
Electrón, IV, XXIV
  de valencia, XXIX
Electronegatividad, XXXVI, XLII
Empédocles, XXIV
Enanas blancas, 102, 186
Encke
  Cometa, 173
  Johann, 173
Enlace
  Covalente, XXXVII
  Iónico, XXXVII
  Peptídico, XLIII
Enrojecimiento, 91
Enzima, XLIII, XLIV, XLVI, XLVII, XLIX, LI, 208–211, 214
Epicuro de Samos, 179
Equilibrio estadístico nuclear, 104
Ergósfera, 111
Eris, 118, 120, 157
Escala alfa, 99
Esfera celeste, 179
Esferoide oblato, 123
Espín, IV, XXX, XXXV, 235, 237
Espacio-tiempo, IV
Espectro, IV
  de exoplanetas, 242
  de la Tierra, 241
  del hidrógeno, XXV
  Electromagnético, XXII
  Solar, 77
  Visible, XXII
Estrella
  51 Pegasi, 180
  Alpha Centauri, 80
  Beta Pictoris, 187
  Betelgeuse, 100
  Fomalhaut, 187
  Gliese 876, 189
  HD 209458, 189
  HR8799, 187
  Upsilon Andromedae, 191

Estrellas
  Agujero negro, 110
  Apagado del núcleo, 97
  Cadena protón-protón, 76, 90
  Ciclo CNO, 90
  Color, 96
  Convección, 96
  Cromósfera y corona, 91
  de neutrones, 108, 186
  Degeneración
  Degeneración del núcleo, 99, 101, 103
  Disco protoplanetario, 175, 186, 193
  Enanas blancas, 102, 186, 188
  Enanas marrones, 95, 186
  Enanas rojas, 96, 193
  Encendido del carbono, 99
  Encendido/flash del helio, 98
  Equilibrio hidrostático, 95, 98
  Evolución, 90
  Fase AGB, 98
  Fase post-AGB, 101
  Fugaces, 133, 171
  Gigante azul, 96
  Gigante roja, 98
  Hipernovas, 110
  Límite de estabilidad, 110
  Luminosidad de Eddington, 96
  Manchas fotosféricas, 184
  Núcleo convectivo, 90, 97, 99
  Nebulosa planetaria, 102
  Opacidad, 90
  Púlsares, 109, 180, 186, 235, 237
  Presión de radiación, 95, 96, 175, 213
  Protoestrella, 93, 175
  Secuencia principal, 95, 96
  Subgigante roja, 98
  Supergigante roja, 99
  Supernovas, 93, 105–108, 110, 180
  Titilar de las, 183
  Wolf-Rayet, 110
Eucarionte, 204, 220, 221
Evento, VI
Eventos, horizonte de, IV
Evolución bioquímica o biológica, L, 209
Exoplanetas, 179
  Astrometría, 183
  Atmósferas, 243
  Circumbinarios, 181
  en púlsares, 180
  Fotometría, 184
  Gigante hinchado, 189
  Júpiteres calientes, 180, 193
  Métodos de búsqueda, 181
  Microlentes gravitacionales, 185
  Migración de planetas gigantes, 178
  Minineptunos, 190, 193
  Nomenclatura, 181
  Observación directa, 185
  Oceánicos, 190, 193
  Profundidad de un tránsito, 189
  Retrógrados, 193
  Supertierras, 181, 184, 190
    COROT-7b, 190
    GJ 1214 b, 190, 244
    Kepler-10b, 190
  Técnica de anulación de la luz, 186, 187
  Velocidades radiales, 180, 183
  Zona habitable, 192, 222
Experimento de Michelson-Morley, XXIII
Experimento de Miller, 206
Experimento de Young, XX
Explosiones de rayos gamma, 110
Extinción, 91
Extremófilos, 213, 216, 221, 231
  Hipertermófilos, 212, 216, 222

Fermentación entérica, 239
Fisión espontánea, XXXIV
Flamsteed, John, 116
Fotón, IV, XXIII
Fotoelectrones, XXIII
Fotosíntesis, 203, 204, 212, 220, 238, 240
Frecuencia, IV
Fuerza
  de Coriolis, 133, 134, 140
  de mareas, 123, 160, 163, 166, 173, 193
  Eléctrica, XXI, XXIV
  Electromagnética, IV
  Gravitacional, 93, 95, 97, 111, 219
  Nuclear, XXXI, 76, 100
Fusión
  Nuclear, IV, 76, 77, 94, 95
  Termonuclear, 76, 94, 109

Galileo

Galilei, 81, 114, 115, 117, 162
Sonda, 123, 163, 164, 174
Gauss, Carl Friedrich, 116
Giordano Bruno, 179
Grietas hidrotermales, 211, 212, 216, 221, 231

Halley
Cometa, 172
Edmund, 172
Heliosismología, 80, 125
Herschel, Friedrich Wilhem, 115
Hidrocarburos, XXXIX, XLIV, 211
Alifáticos, XXXIX
Aromáticos, XXXIX
Hidrofóbicas
Capas, 211
Interacciones, XLVI, XLVII, 210, 211
Hipernovas, 110
Hipparcos, 189
Horizonte de los eventos, IV, 111
Huygens
Christiaan, XII, XX, 115
Principio de, XII
Sonda, 166

Interacción nuclear
Débil, V, 219
Fuerte, V, XXXI, 219
Interferometría, 186
Invernadero
Efecto, 138, 141, 165, 191, 192, 202, 230, 238
Gases, 205, 238, 240
Ionización, XXIX
Isótopo, V, XXX, XXXI, XXXIII
Deuterio, 76, 79, 95
Estable, V
Radiactivo, V

Júpiter
Anillos, 152
Gran mancha roja, 115, 152
Mitología, 118

Kepler
Primera ley, 124
Supernova de, 107
Telescopio espacial, 184
Tercera ley, 115, 125, 183
Kuiper
Cinturón de, 114, 118, 121, 155, 157, 158, 170, 171, 178
Gerald, 155, 171

Límite
de Chandrasekhar, V, 103, 219
de Shömberg-Chandraseckar, 97
Línea
de 21 [cm], 235
de los hielos, 176
Espectral, XI, XXV
Lípidos, 210, 211
Ley
de Spörer, 88
de Titius-Bode, 116
Longitud de onda, V, IX
Lowell, Percival, 117, 227
Luna, 124, 146, 159
Cara oculta, 159
Formación, 123
Interior, 161
Libración, 159
Mares, 159
Programa Apollo, 160
Rotación sincrónica, 159
Luz cenicienta, 241

Método científico, 225
Maremoto tectónico, 130
Marte, 138, 226
Atmósfera, 227
Campo magnético, 144, 229
Mitología, 120
Rotación, 138
Satélites, 161
Valle de Cidonia, 228
Vida en, 228
Masa, V
Maunder
Edward, 84
Mínimo de, 84
Maxwell, James, XXI
Mecánica
Cuántica, V, XXVII, XXVIII
Medio interestelar, 91
Contaminación del, 90, 105, 106

Interacción con chorros, 110
Química del, 101, 198, 199
Mensaje de Arecibo, 234
Mercurio, 137
Campo magnético, 138
Mitología, 120
Núcleo, 150
Rotación, 137
Superficie, 146
Metanogénesis, 205
Meteorito, 148, 207
ALH84001, 216, 229, 230
de Murchison, 207
Marciano, 148
SNC, 150
Meteoros, 133
Lluvias de, 172
Microlentes gravitacionales, 109, 181, 185
Modelo
Atómico, XXIV
Heliocéntrico, 121, 124
Molécula, XXXIV, XXXVI
Quiral, XL
Momento dipolar magnético, 136
Momentum
Angular, XXVIII
Lineal, XXVI, XXXV
Multiversos, 218

Nebulosa, 91, 217
Cabeza de Caballo, 92
de emisión, 92
de reflexión, 92
del homúnculo, 96
Oscura, 92
Planetaria, 102
Saco de Carbón, 92
Neptuno, 117, 118, 151, 153, 168
Gran mancha oscura, 153
Mitología, 119
Neutrón, V, XXX
Newton
Tercera ley de Kepler, 125, 156
Nube
de Oort, 170
Molecular, 93, 175, 200
Nucleón, XXX
Nucleótidos, XLVIII
Nuclear
Fusión, IV
Núcleo
Atómico, V, XXX, XXXI
Degenerado, 98, 99, 101, 103
Número
Atómico, V, XXVIII, XXXVI
Cuántico
Azimutal, XXVIII, XXXIV
de espín, XXX, XXXV
Magnético, XXVIII, XXXIV
Principal, XXVII, XXIX, XXXIV
Másico, V, XXX

Objeto transneptúnico, 118
Oblatitud, 123, 146
Olbers, Heinrich Wilhem Mathias, 116
Ondas, VII
Amplitud, VIII
Armónicas, VIII
de cuerpo, 125
de materia, XXVI
de presión, IX, XIX, 80
de radio, XXII
Difracción, XIII
Electromagnéticas, XXII, XXV
Estacionarias, XVI, XXVIII
Frecuencia, IX
Frente de, XII
Función de, XXVII, XXVIII, XXXVI
Infrarrojo, XXII
Interferencia, XIII
Constructiva y destructiva, XV
Longitud de onda, IX
Longitudinales, VIII, 125
Magnetohidrodinámicas, 83
Mecánicas, VII
Microondas, XXII
Período, IX
Polarización, XIV
Primarias, 125
Refracción y reflexión, XII
Sísmicas, 125
Secundarias, 125
Sonoras, XVIII
Superficiales, VIII, 125

Transversales, VIII, 125
Tren de, VIII
Ultravioleta, XXII
Zonas de compresión, IX
Zonas de rarefacción, IX
Óptica adaptativa, 186
Orbital, XXVIII
Molecular, XXXVI
Antienlazante, XXXVII
Enlazante, XXXVII
OVNI, 225

Péptidos, XL
Púlsares, 109, 180, 186
PAH (hidrocarburos aromáticos policíclicos), XXXIX, 199, 207, 215
Palas, 116
Pangea, 129
Paradoja de Fermi, 232
Paralaje
Geocéntrica o diurna, 169
Solar, 169
Partícula
Elemental, V
Virtual, V
Partículas
Alfa, 98, 99, 104
Antineutrinos, 104
Beta, 104
Bosones y fermiones, XXX
Deuterón, 76
Hadrones, XXXI
Bariones, XXXI
Mesones, XXXI
Leptones, 219
Neutrinos, 79, 98, 105
Neutrinos solares, 79, 80
Quarks, XXXI
Penumbra, 81
Peptídicos
Enlaces, XLIII–XLVI, 208, 209, 211
Planos, XLIII, XLIV
Peso, VI
Piazzi, Giuseppe, 116
Pléyades, 92
Planetas
Clasificación, 122
Definición, 121
Enanos
Ceres, 116, 155
Eris, 118, 157
Haumea, 157
Makemake, 157
Plutón, 117, 118, 121, 155, 168
Quaoar, 158
Sedna, 158
Exteriores, 122
Extrasolares, 179
Gigantes, 151
Gaseosos, 151, 188, 193
Helados, 151, 188
Interiores, 123, 137
Marte, 138, 226
Mercurio, 137
Mitología, 118
Neptuno, 117, 118, 151, 153, 168
Rocosos, 193
Urano, 116, 117, 151, 153
Venus, 137
Planetesimales, 177
Planetología comparativa, 123
Plasma, 78, 94, 101, 114, 133, 136, 141, 154
Platón, XX, 200
Plutón, 117, 118, 121, 155, 168, 227
Atmósfera, 156
Caronte, 156
Interior, 157
Mitología, 119, 120
Resonancia 3:2, 156
Satélites, 157
Polarización
Circular, XIV, 140, 146
Elíptica, XV
Lineal, XIV, 91
Polvo, 91, 92, 101
Anillos circumestelares, 187
Disco de, 187
en cometas, 171
Interestelar, 215
Interplanetario, 114, 151, 152, 161, 176, 207, 208
Positrón, VI
Potencial de membrana, 210, 211
Presión de degeneración, 101

Electrónica, 102–104, 112
Neutrónica, 105, 108, 112
Presión de radiación, 95, 96, 175
Principio antrópico, 200, 217
Débil, 217, 218
Fuerte, 217, 218
Principio de exclusión, XXX, XXXIII, XXXV, 101, 104
Principio de incerteza de Heisenberg, XXVII
Procarionte, 203, 220, 221
Protón, VI
Proteínas, XXXVIII, XL, XLIV–L, 200, 207–212, 214, 238
Estructura, XLIV
Funciones, XLIV
Serin-proteasas, XLVI
Víricas, LI, LII
Protobionte, 212
Protoplanetas, 177
Puente de hidrógeno, XLII, XLV, XLVII, XL-VIII
Puntos lagrangianos, 168

Química
en el medio interestelar, 101, 198, 199
Orgánica, XXXVIII, 199
Prebiótica, 205, 224, 230
Quark, VI
Quimiosíntesis, 216, 220

Radiación
de fondo de microondas, VI
Ionizante, XXXII
Radiactividad, VI, XXXI, XXXII, 219
Radicales libres, XXXIX
Rayos
Cósmicos, VI, 79
Gamma, VI, XXII, XXXII
X, XXII, XXXII
Regiones HII, 92
Relatividad
Especial, VI, 76, 103
General, VI, 109, 111
Resonancia
Giro-orbital, 137
Orbital, 118

Síndrome de inmunodeficiencia adquirida (SI-DA), LI
Satélites
Calisto, 164
Deimos, 161
Dione, 115
Encelado, 167, 232
Europa, 163, 230
Fobos, 161
Galileanos, 162
Ganímedes, 158, 163
Io, 162, 224
Japeto, 115
Luna, 159
Rhea, 115
Thetis, 115
Titán, 115, 158, 164, 205, 230
Tritón, 167
Saturno
Anillo E, 167
Anillos, 115, 151
División de Cassini, 115, 152
Mitología, 118
Schiaparelli, Giovanni, 226
Schwabe, Heinrich, 84
Schwarzschild
Agujero negro de, 111
Karl, 111
Radio de, 111
Señal Wow, 235
Seeing, 186
Semivida, VI
SETI (Search for ExtraTerrestrial Intelligence), Proyecto, 198, 225, 234, 236
Shoemaker-Levy 9, 174
Singularidad, VI, 111
Sismología, 125
Sistema solar, 114, 115
Cinturón de asteroides, 114
Cinturón de Kuiper, 114, 118, 121, 155, 157, 158, 170, 171, 178
Cometas, 171, 172, 202, 207, 208, 214, 216
Objetos trans-neptunianos, 170
Planetas, 121, 137
Planetas enanos, 118, 121, 123
Planetas exteriores, 122
Planetas gigantes, 122, 151
Planetas interiores, 123, 137

Planetas rocosos, 123, 137, 149
Plutinos, 118, 157, 170
Satélites, 115
Sol, 76
Agujeros coronales, 86
Campo magnético, 87, 89
Ciclo solar, 89
Composición química, 77
Constante solar, 77
Corona, 83
Cromósfera, 82, 83
Diagrama de mariposa, 88
Erupciones solares, 85
Espículas, 82
Espectro, 77
Eyecciones de masa coronal, 86
Fáculas, 82
Filamentos, 87
Fotósfera, 78, 80
Fulguraciones, 84, 85
Granulación, 81
Heliopausa, 114
Heliosismología, 80
Ley de Spörer, 88
Llamaradas, 85
Mancha guía, 87, 89
Manchas solares, 81, 85, 87, 88, 114
Ciclo de, 84
Mínimo de Maunder, 84
Núcleo, 78
Neutrinos solares, 79
Nucleosíntesis de helio, 79
Oscurecimiento del limbo, 81
Problema de los neutrinos solares, 79
Prominencias, 82, 87
Radio, 76
Regiones activas, 85
Rotación, 81, 87
Supergránulos, 82
Tamaño, 76
Tamaño angular, 76
Viento solar, 85, 140
Zona convectiva, 78, 80, 84, 87
Zona de transición, 83
Zona radiativa, 78
Sonda
Cassini, 152, 153, 165, 167, 232
Clementine, 160
Galileo, 123, 163, 164, 174, 240
Giotto, 173
Hayabusa, 169
Huygens, 166
Lunar Prospector, 160
Lunik, 159, 160
Lunojod, 160
Magellan, 147
Mariner, 138, 227
Mars Global Surveyor, 229
MESSENGER, 138, 146
New Horizons, 157, 162
Pioneer, 237
Spirit, 230
Surveyor, 215
Venera, 147
Venus Express, 140
Viking, 227, 228
Voyager, 153, 167, 237
Supernovas, 93, 105–108, 110, 180, 217
Hidrodinámicas, 106
Remanente de, 106, 109
SN 1987A, 105–107
Superrotación, 140, 166

Tabla Periódica, XXXV
Telescopio espacial
CoRoT, 184, 190
Hubble, 141, 155, 156, 163, 175, 187
Interferométrico
Darwin, 244
Terrestrial Planet Finder, 244
James Webb, 244
Kepler, 184
Spitzer, 186
Teoría
Corpuscular de la luz, XX
Cuántica, XXVII, XXVIII
del átomo, XXXIV
de campo unificado, VI
de la evolución de Darwin, 201
de la panspermia, 200, 201, 213, 214, 216, 232
de la panspermia dirigida, 216
de la relatividad especial, VI, XXIV, 76, 103

de la relatividad general, VI, 109, 111
del Big-Bang, III
del dínamo, 136, 150, 223
Electromagnética, XXI
Nebular, 176, 193
Teoría atómica, XXIX
Tiempo de residencia
Metano, 145, 205, 238
Tierra, 123
Atmósfera, 131
Circulación, 133
Campo magnético, 128, 135
Capa de ozono, 204
Corteza, 126
Densidad media, 125
Estructura, 125
Formación, 123
Formación de Nubes, 134
Interior, 126
Manto, 126
Núcleo, 127
Movimientos
Nutación, 124
Precesión, 124
Rotación, 124
Traslación, 124
Núcleo, 224
Primigenia, 202
Primordial, 230
Tectónica de placas, 129, 204, 223
Titán, 115, 158, 164, 205, 230
Atmósfera, 164, 230
Superficie, 165
Tycho
Supernova de, 107, 114

Ufología, 226
Umbra, 81
Unidad astronómica, 115
Urano, 116, 117, 151–153
Anillos, 152
Mitología, 118

Velocidad radial, XI, 183
Venus, 137
Campo magnético, 140
Mitología, 120
Rotación, 137
Superrotación, 140
Vesta, 116
Virus, LI
de la inmunodeficiencia humana (VIH), LI
Retrovirus, LI
VLT (Very Large Telescope), 186, 187
Vostok, Lago, 231

Zona de obducción, 129
Zona de subducción, 129, 204